



# **ePORSCHE - MOOTTORIN JA INVERTTERIN VALINTA SÄHKÖMUUNNOSAUTOON**

Jukka-Pekka Pirhonen

Opinnäytetyö  
Kesäkuu 2011  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka  
Tampereen ammattikorkeakoulu

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

PIRHONEN, JUKKA-PEKKA: ePorsche - moottorin ja invertterin valinta sähkömuunnosajoneuvoon

Opinnäytetyö 72 s., liitteet 1 s.  
Kesäkuu 2011

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutustua sähkömoottorin ja moottorinohjaimen mitoitusperiaatteisiin sähkömuunnosajoneuvojen kannalta. Opinnäytetyön taustalla oli käytännön projekti, jossa polttomoottorikäyttöinen Porsche 928 S4 -auto pyrittiin muuntamaan sähkökäyttöiseksi. Käytännön projekti jäi kesken rahoitusongelmien vuoksi, mutta mitoitus laskettiin loppuun teoriasolla. Porsche-projekti tehtiin yhteistyössä Tampereen Sähköajoneuvokeskuksen, Tampereen ammattikorkeakoulun ja Tampereen ammattiopiston kanssa.

Opinnäytetyössä käsitellään sähkö- sekä muunnossähköautojen rakennetta, niihin soveltuvia moottoreita ja moottoriohjaimia. Työn pohjana olevaan Porsche 928 S4 -autoon mitoitetaan sen tehotarpeita vastaava moottori ja moottoria ohjaava invertteri. Opinnäytetyön liitteeksi tehtiin myös moottorin ja invertterin valintaan suuntaa antava taulukkolaskentatyökalu.

Sähkö- ja hybridautot ovat pitkään olleet kiivaan väittelyn kohteena. Sähköautojen suurin ongelma on ollut ja on edelleen ajoakusto. Nykyisillä akkuteknologioilla saavutetaan tyypillisesti muutaman kymmenen kilometrin kantama, ja akkujen lataaminen on hidasta. Akkujen ja sähkökäyttöjen kehitys jatkuu kuitenkin kiivaana, kun isot autovalmistajat tuovat lähitulevaisuudessa omat mallinsa markkinoille. Kun sähkö tuotetaan käyttäen uusiutuvia energiavaroja, voidaan sähköajoneuvoja käyttämällä pienentää liikenteestä syntyviä hiilidioksidipäästöjä.

## ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electric Engineering  
Option of Electrical Power Engineering

PIRHONEN, JUKKA-PEKKA: ePorsche – dimensioning an electric motor and a motor controller for an electric car conversion

Bachelor's thesis 72 pages, appendices 1 page  
June 2011

---

The purpose of this bachelor's thesis was to study the dimensioning principles of electric motors and motor controllers for an electric car conversion. The basis of this thesis was a practical project in which a Porsche 928 S4 fuel engine car was supposed to be converted to an electric version of the original. The project was carried out in co-operation with the Tampere Electric Vehicle Center, Tampere University of Applied Sciences and Tampere College.

This thesis covers the structures of both electric and electric conversion vehicles and the suitable motors and motor controllers for them. The practical project wasn't able to be finished due to financial reasons but the dimensioning was completed in a theoretical level. A spreadsheet program which helps to dimension an electric motor and a motor controller is included as an appendix.

Electric and hybrid electric vehicles have long been under heated debate. The biggest problem with electric cars has been and still is the battery system. With current battery technologies it is possible to achieve a range under 50 kilometers. The charging of the batteries is also slow. The development of batteries and electric uses goes on rapidly as big car manufactures bring their own models to the market in the near future. If the electricity used in electric cars is produced using renewable resources, it is possible to lower the carbon footprint of vehicles.

---

Keywords: Electric car, motor, inverter, conversion vehicle, dimensioning

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	HYBRIDI- JA SÄHKÖAJONEUVOT .....	7
2.1	Hybriditekniikka .....	7
2.1.1	Sarjahybridi .....	7
2.1.2	Rinnakkaishybridi .....	8
2.1.3	Jaetun tehon hybridi .....	9
2.2	Täyssähköautot .....	11
2.2.1	Sähköajoneuvojen historia .....	11
2.2.2	Sähköautot nykypäivänä .....	14
2.2.3	ERA (Electric Raceabout) .....	18
2.3	Muunnossähköauto .....	20
2.4	Muunnosautojen käyttöprofiili .....	20
3	SÄHKÖMOOTTORIT MUUNNOSÄHKÖAUTOIHIN .....	21
3.1	DC-moottori .....	21
3.1.1	Hiiliharjalliset DC-moottorit .....	23
3.1.2	Hiiliharjattomat DC-moottorit .....	25
3.2	AC-moottorit .....	27
3.2.1	Oikosulkumoottori .....	27
3.2.2	Liukurengasmoottori .....	31
3.2.3	Vierasmagneetoitu tahtikone .....	32
3.2.4	Kestomagneettitahtikone .....	34
4	SÄHKÖMOOTTORIN OHJAUS .....	36
4.1	DC-moottorin ohjaus .....	36
4.2	AC-moottorin ohjaus .....	38
4.2.1	Pulssinleveysmodulointi .....	39
4.2.2	Skalaariohjaus- ja säätö .....	39
4.2.3	Vektorisäätö .....	40
4.2.4	DTC-säätö .....	42
5	EPORSCHE 928 S4 .....	44
5.1	Auton ja opinnäytetyöprojektin tausta .....	44
5.2	Tehonsiirtojärjestelmän mitoitus .....	46
5.2.1	Gravitaatiovoima .....	47
5.2.2	Vierintävastus .....	47
5.2.3	Ilmanvastus .....	48

5.2.4	Tehonsiirron hyötysuhde .....	48
5.2.5	Tehotarve tasaisella .....	48
5.2.6	Ylämäkiajo.....	54
5.3	Moottorivalinnan tulokset .....	56
5.4	Invertterivalinnan tulokset .....	59
5.5	Suorituskykyvertailu polttomoottori- ja sähköversion välillä .....	61
6	EXCEL-TYÖKALU MOOTTORIN JA INVERTTERIN VALINTAAN .....	66
7	YHTEENVETO .....	67
LÄHTEET .....		69
LIITTEET .....		73

## 1 JOHDANTO

Fossiilisten polttoaineiden vähentyessä ja maailman väkiluvun kasvaessa, tarve vaihtoehtoisella energianlähteellä kulkevalle autolle kasvaa. Kun otetaan huomioon vielä polttomoottorien aiheuttama vaikutus ilmaston lämpenemiseen, tarve suurenee entisestään.

Sähköautotoiminta on Tampereen seudulla ollut alusta alkaen hyvin aktiivista. Seudun yritystoiminnan kehittämiseen ja tukemiseen keskittynyt Tredea vuokrasi kaupungin kanssa Tampereen Ruskossa sijaitsevalta tehdasalueelta vanhan Volvon linja-autotehtaan tiloista osan Sähköautot - Nyt! -yhteisön ja aktiivisten harrastajien käyttöön. Tampereen yliopistolla toimiva tutkija Antti Syvänen kiinnostui itsekin yhteisön toiminnasta ja hankki sähkömuunnosauton pohjaksi Porsche 928 S4 automaticin. Suunnittelun osalta hän kääntyi TAMK:n puoleen, sillä aiheesta oli mahdollista saada hyviä opinnäytetyöaiheita.

Sähköautot jakavat ihmisten mielipiteitä hyvin radikaalisti. Osasyynä joidenkin ihmisten pessimistiseen suhtautumiseen johtuu näyttöjen vähyydestä: Paljon keskustelua ja kehitystyötä, mutta valmiita ajoneuvoja todella vähän. Tämän vuoksi mahdollisuus päästä suunnittelemaan sähkökäyttöistä urheiluautoa tuntui erinomaiselta opinnäytetyön aiheelta. Kyseessä olevassa muunnosprojektissa oli mukana myös kolme muuta sähkötekniikan opiskelijaa. Tässä työssä keskitytään sähkömuunnosauton moottorin ja invertterin mitoituksen periaatteisiin.

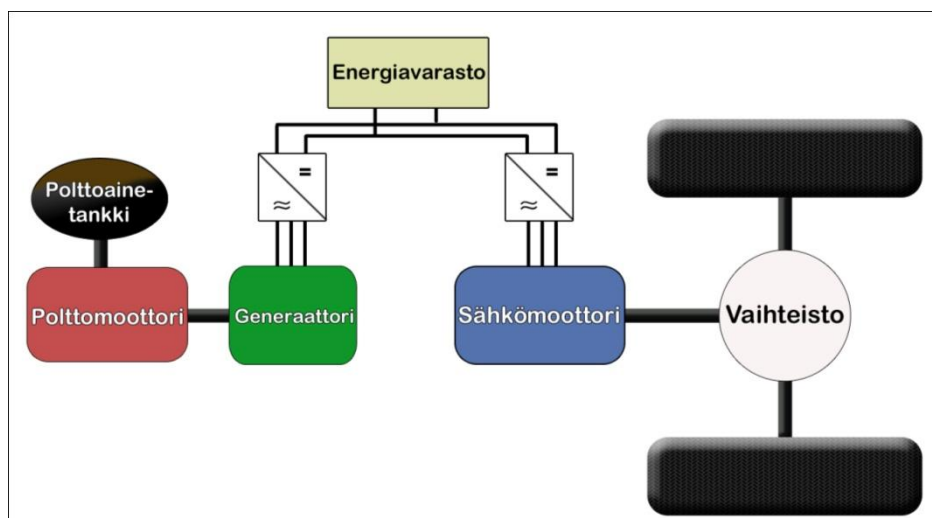
## 2 HYBRIDI- JA SÄHKÖAJONEUVOT

### 2.1 Hybriditekniikka

Kun puhutaan ajoneuvoista, sanalla hybridi tarkoitetaan kahden eri erilaisen voimalähteen yhdistelmää. Hybridivoimansiirrot voidaan jakaa kolmeen eri pääluokkaan niiden rakenteen mukaan: sarjahybridiin, rinnakkaishybridiin ja jaetun tehon hybridiin. Pääluokista on myös erilaisia kompleksisia yhdistelmiä, mutta käsittelemme tässä luvussa vain perusesimerkit.

#### 2.1.1 Sarjahybridi

Sarjahybridirakenteessa polttomoottori ja sähkömoottori on kytketty sarjaan, jossa polttomoottoria ei ole mekaanisesti suoraan kytketty vaihteistoon ja voimansiirtoon. Voimanlähteenä toimii siis sähkömoottori, joka saa energiaa akustolta tai generaattorilta polttomoottorin kautta tai molemmilta. Sarjahybridirakenne on havainnollistettuna kuviossa 1.



KUVIO 1. Sarjahybridirakenteen periaatekuva (Lo E.W.C. 2009, 1, muokattu)

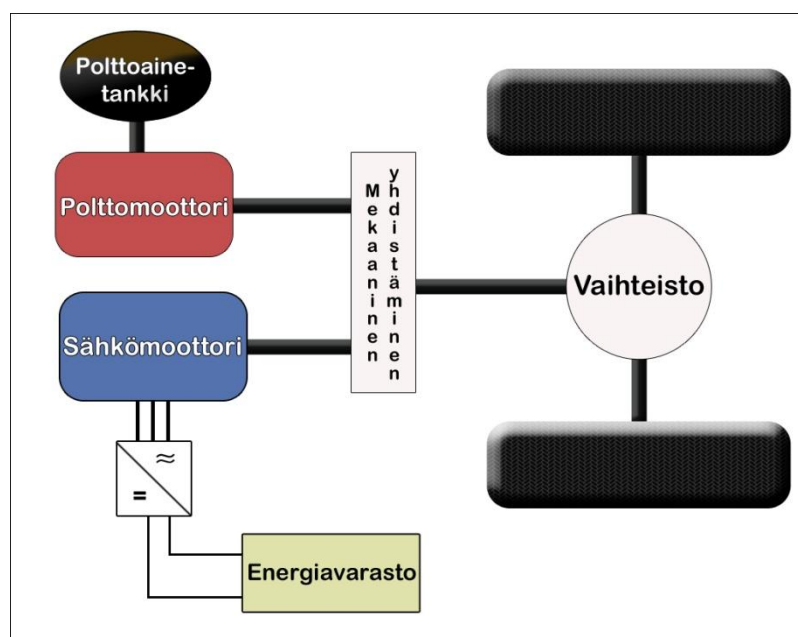
Koska polttomoottorin pyörimisnopeus ei ole, mekaanisen kytkennän puutteen takia, riippuvainen kuormasta, voidaan pyörimisnopeus asettaa parhaan hyötysuhteen mukaiseksi, jolloin polttomoottori tuottaa tehoa optimaalisesti.

Koska sarjahybridin rakenne on yksinkertainen ja koska kuormaa pyöritetään vain sähkömoottorilla, auton ohjauskin on helppoa. Sähkömoottori voi myös toimia generaattorina jarrutustilanteissa, jolloin jarrutuksesta saadaan regeneratiivisesti energiaa talteen. Sarjahybridirakenne onkin parhaiten soveltuva vaihtelevan kuormitusyötyön, joka sisältää runsaasti jarrutuksia. (Liu & Peng 2006, 468)

Jos sähkökomponentteja tarkastellaan yksitellen, on niiden hyötysuhde hyvä, mutta koska polttomoottorin teho joutuu kulkemaan generaattorin, tasa- ja vaihtosuuntaajan sekä sähkömoottorin läpi, on tehonsiirron kokonaishyötysuhde kuitenkin huomattavasti alhaisempi (Liu & Peng 2006, 469). Kolmen voimakoneen (generaattori, poltto- ja sähkömoottori) takia rakenne on painava ja tilaa vaativa. Sarjahybriditä onkin järkevintä käyttää rautatiekalustossa, suuremmissa työkoneissa sekä kaupunkilinja-autoissa (Hietalahti 2010, 14).

### 2.1.2 Rinnakkaishybridi

Toisin kuin sarjahybridissä, rinnakkaishybridirakenteessa polttomoottori on mekaanisen voimansiirtojärjestelmän kautta yhteydessä kuormaan. Rinnakkaishybridin rakenne on esitetty kuviossa 2.



KUVIO 2. Rinnakkaishybridin perusrakenne (Lo E.W.C 2009, 2, muokattu)

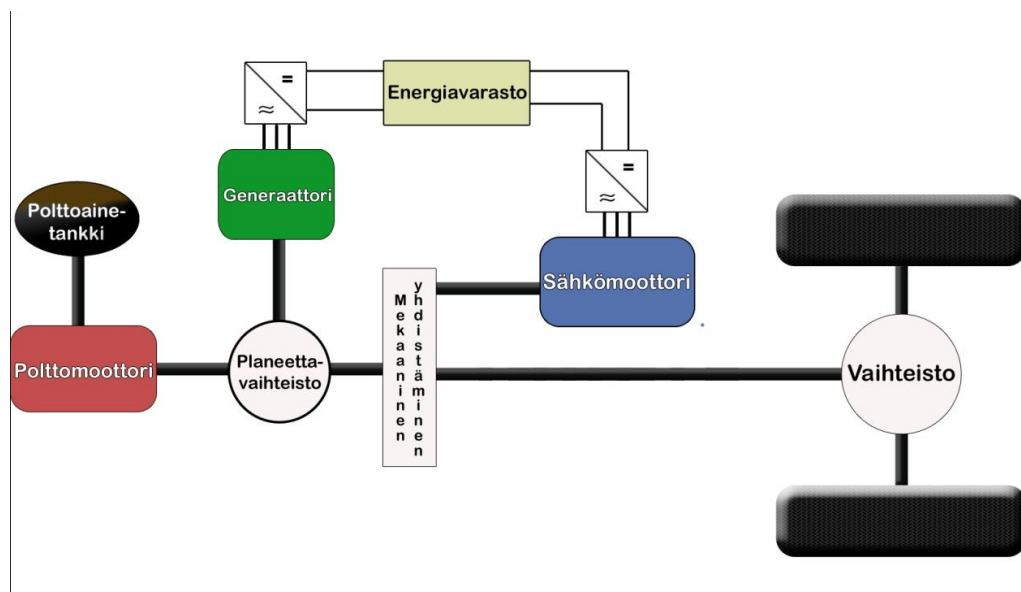


Rinnakkaishybridissä polttomoottorin pyörimisnopeus on kiinteästi sidoksissa kuorman pyörimisnopeuteen. Sähkömoottori toimii avustavana voimakoneena huippukuormitustilanteissa, ja se ottaa talteen jarrutustehoa ja polttomoottorin mahdollisesti tuottamaa ylijäämätehoa.

Koska polttomoottori tuottaa pääasiallisen tehon, voidaan sähkömoottori mitoittaa pienemmäksi – yleensä puolet kuorman maksimitehotarpeesta. Rakenne sisältää vain kaksi voimakonetta, joten ne eivät vaadi yhtä paljon tilaa ja painovarausta kuin sarjahybridi. Voimansiirrossa ei tapahdu sähkökomponenttien vähyyden takia suuria tehohäviöitä, mutta kokonaishyötysuhdetta laskee kuitenkin työtä tekevä polttomoottori. Rinnakkaishybridin mekaaninen rakenne on haastava toteuttaa, ja sen ohjaaminen on monimutkaisempaa kuin sarjahybridin. (Hietalahti 2010, 15)

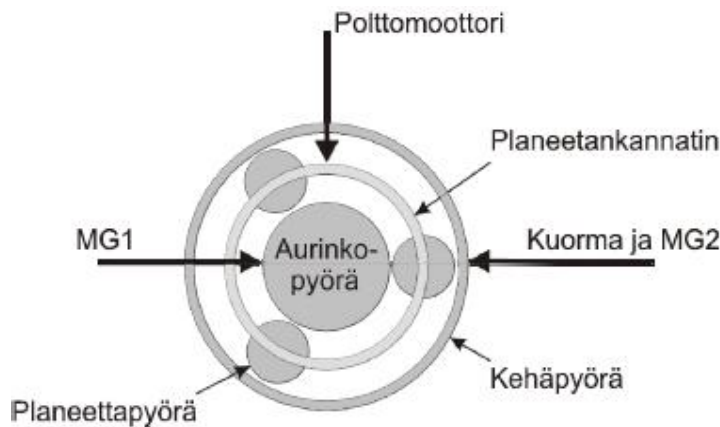
### 2.1.3 Jaetun tehon hybridi

Käsitteet jaetun tehon hybridi (kuvio 3) ja sarja-rinnakkaishybridi menevät kirjallisuudessa osittain päällekkäin. Molemmat topologiat hyödyntävät sarja- ja rinnakkaishybridien ominaisuuksia. Sarja-rinnakkaishybridissä on sarjahybridiin verrattuna ylimääräinen mekaaninen yhteys polttomoottorilta kuormalle ja rinnakkaishybridiin verrattuna ylimääräinen generaattori. (Hannikainen 2009, 3)



KUVIO 3. Jaetun tehon hybridin periaatekuva. (Lo E.W.C 2009, 3, muokattu)

Jaetun tehon hybridi koostuu polttomoottorista, sähkömoottorista, generaattorista, tasa- ja vaihtosuuntaajasta, energiavarastosta ja portaattomasta planeettavaihteistosta (kuvio 4). Osa polttomoottorin tehosta siirretään mekaanisesti kuormalle ja loput muunnetaan generaattorilla sähköenergiaksi sarjahybridin tavoin. Energia kulkee energiavaraston kautta sähkömoottorin käytettäväksi tai jää talteen myöhempää käyttöä varten. Planeettavaihteen ansiosta välityssuhteen portaaton muutos on mahdollista ja voimansiirto voidaan toteuttaa myös useamman planeettapyörästön avulla, jolloin välityssuhdetta voidaan säätää ja polttomoottorin nopeutta ohjata entistä vapaammin. Sähkökoneita syöttävät suuntaajat ovat kytkettynä joko suoraan tai hakuriteholähteiden kautta energiavarastoon. (Liu, Peng & Filipi 2005, 134–139)



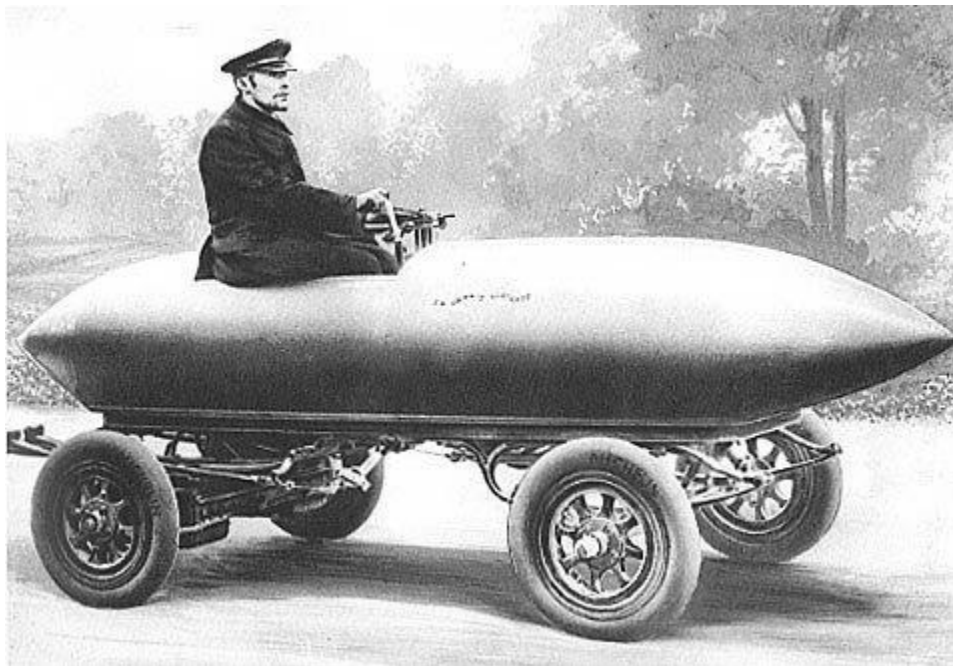
KUVIO 4. Planeettavaihte (Äijälä 2008, 5)

Kuviossa 4 MG1:llä tarkoitetaan generaattoria ja MG2:lla sähkömoottoria. Planeettavaihteessa on aurinkopyörä, kehäpyörä, planeettapyörät sekä planeetankannatin, johon planeettapyörät on kytketty. Aurinko- ja kehäpyörän hammaslukujen suhde määrää vaihteen akseleilla vaikuttavien momenttien suhteet toisiinsa. Ne pysyvät vakioina pyörimisnopeuksista ja kokonaistehosta riippumatta. Tehonsiirtosuhde akselien välillä vaihtuu akselien pyörimisnopeuden vaikutuksesta. (Gao & Ehsani 2006, 741–745)

## 2.2 Täyssähköautot

### 2.2.1 Sähköajoneuvojen historia

Harva tietää, että sähköautot otettiin käyttöön ennen polttomoottoriautoja. Sähköautot olivat itseasiassa vielä 1900-luvun alussa suositumpia kuin polttomoottorivastineensa. Joitankin sähköisiä ajoneuvoja rakennettiin jo 1800-luvun puolella. Ensimmäiset kohteet olivat sotilaskäyttöön suunnitellut vaunut. 1800-luvun loppupuolella belgialainen Camille Jenatzyn rikkoi Le Jamais Contente -sähköautolla (kuva 1) maagisen 100 km/h:n rajan. (electricvehiclesnews.com, 2010)

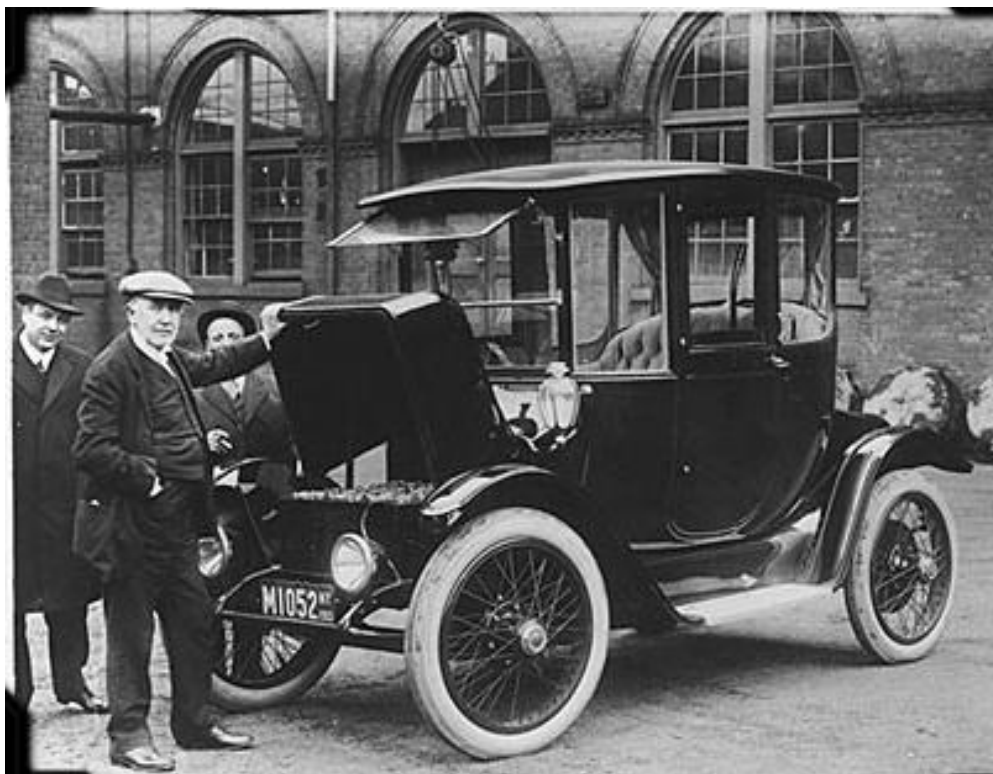


KUVA 1. Camille Jenatzyn ja Le Jamais Contente -sähköauto (Kuva: electricvehiclesnews.com, 2010)

Autossa oli kaksi suoraan renkasiin kytkettyä 25 kW:n Postel-Vinay-moottoria, jotka toimivat 200 V:lla ja 124 A:lla, tuottaen noin 68 hevosvoiman tehon. (electricvehiclesnews.com, 2010)

1900-luvun alussa New Yorkin kuuluisat taksitkin kulkivat sähköllä. Kuljettaja ajoi välillä auton taksiasemalle ja vaihtoa akut täysiin ja jätti vanhat akut

lataukseen. Tämä oli lupaava alku vaihtoakkujärjestelmän synnylle ja kaikki muu sähköteknologia oli myös valmiina käytettäväksi. Taksit oli valmistanut yhtiö nimeltä Electric Vehicle Company, joka sai paljon tukea sijoittajiltaan. Polttomoottoritekniikka teki tulojaan ja yhtiö päättikin hankkia kilpailevan tekniikan polttomoottoriauton patentin Selden-nimiseltä mieheltä. Yhtiön omistajat tajusivat pian, että polttomoottorin valmistuksesta kerättävät lisenssimaksut olivat helppo tapa rikastua, mutta autoihin oli varaa vain rikkailla, joten autoja ei tulisi myymään paljon. Tilanteeseen toi kuitenkin vuonna 1911 läpimurron kaikkien tuntema Henry Ford, joka toi markkinoille sarjatuotantona valmistetun polttomoottorisen T-Fordin, johon lähes jokaisella työläiselläkin oli varaa. Vaikka T-Fordista tulikin huippumenestys, tahtoi Ford kuitenkin kääntyä takaisin sähköautojen kehitykseen, sillä hän oli huolissaan öljymonopoliin mahdollisesta keinottelusta ja Yhdysvaltojen uhasta joutua riippuvaiseksi tuontiöljystä. (Chris Paine, 2006)



KUVA 2. Henry Ford ja Thomas Edison sekä heidän sähköautonsa prototyyppi vuonna 1913 (Kuva: sähköautot.fi, 2010)

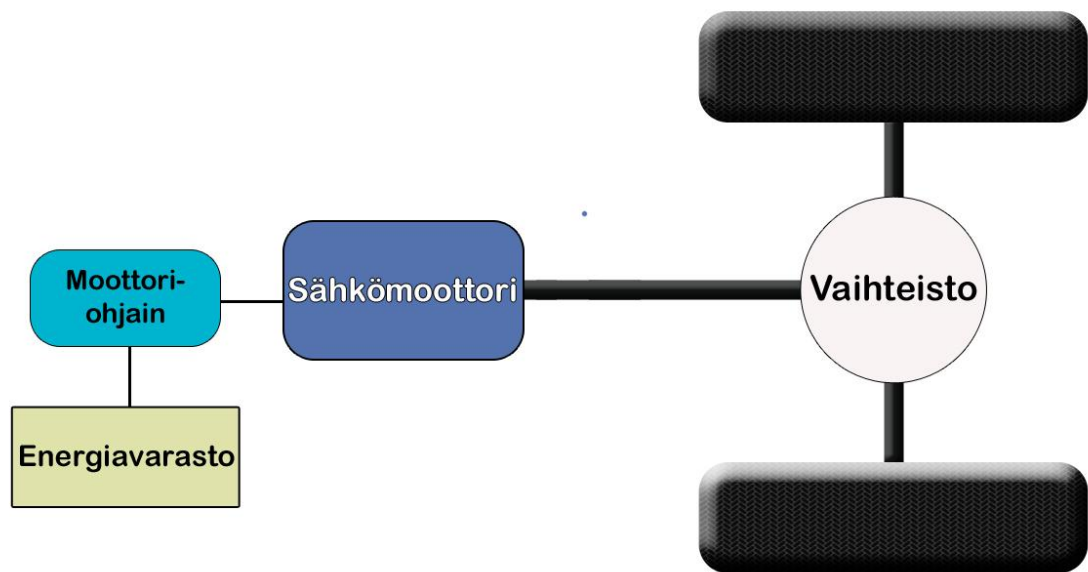
Vuonna 1914 keksijä Thomas Edison ryhtyi Fordin kanssa suunnittelemaan sähköautoja, joilla oli tarkoitus täyttää Yhdysvaltojen kaikki kadut ja tiet. Edison

ja Ford olivat jo aiemmin tehneet yhdessä muutamia sähköautojen prototyyppejä. Edisonin tehtävänä oli valmistaa autoon akut, joilla ajaisi kertalatauksella noin 100 kilometriä. Suunnitteilla oli myös lataus- ja vaihtoakkuverkosto, jotta pidemmätkin maantietmatkat olisivat olleet käytännössä mahdollisia. Hanke keräsi nopeasti 350 miljoonan dollarin pääoman innokkailta sijoittajilta. Tavoitteena oli reilun vuoden kehittelyn jälkeen tuottaa jopa 150 000 kohtuuhintaista sähköautoa. Edisonin akut eivät kuitenkaan toimineet Fordin autoissa (kuva 2) odotetusti, vaikka laboratoriossa akut olivat suoriutuneet testeistä hyvin. Tänäkään päivänä ei tiedetä, miksi Edisonin akut eivät toimineet Fordin autoissa. Ongelmat kiristivät heidän välejänsä ja lopullisina niitteinä hankkeelle olivat Edisonin laboratorion palo ja pian alkanut ensimmäinen maailmansota, jossa polttomootoriautojen kysyntä räjähti. Tämän seurauksena sähköautohankkeet pysähtyivät tuleviksi vuosikymmeniksi täysin. (Chris Paine, 2006)

General Motors oli ensimmäinen, joka tarttui uudelleen sähköautokonseptiin vuonna 1990. Oli kulunut siis lähes 80 vuotta ennen kuin sähköautot tekivät jälleen uutta tulemistaan. General Motorsin auton prototyypin nimi oli Impact, mutta valmis sarjatuotantoinen auto sai nimen EV1. Auton esittely sai Kalifornian ilmanlaadusta vastuussa olevat viranomaiset liikkeelle, ja he asettivatkin lain, joka määräsi jokaisen autovalmistajan tuottamaan pienen kiintiön verran nollapäästöisiä ajoneuvoja. General Motors, Ford, Honda, Toyota, Nissan ja Chrysler ehtivät jokainen tuottaa oman mallinsa markkinoille, ennen kuin ne vedettiin kaikki pois, koska Heidän mukaansa sähköautojen kysyntä oli heikkoa ja huomattavasti näitä kehittyneempi vetyauto tulisi kohta markkinoille. Kuten tiedetään, vetyauto on edelleen kehitysasteella. Näin sähköautot hävisivät jälleen taistelussa polttomootoritekniikkaa vastaan. (Chris Paine, 2006)

### 2.2.2 Sähköautot nykypäivänä

Kiihtynyt keskustelu ilmaston lämpenemisestä ja fossiilisten polttoaineiden käytöstä on nostanut sähköautot jälleen kiivaan väittelyn kohteeksi. Sähköautojen perusrakenne on melko yksinkertainen, kuten kuviosta 5 voidaan nähdä.

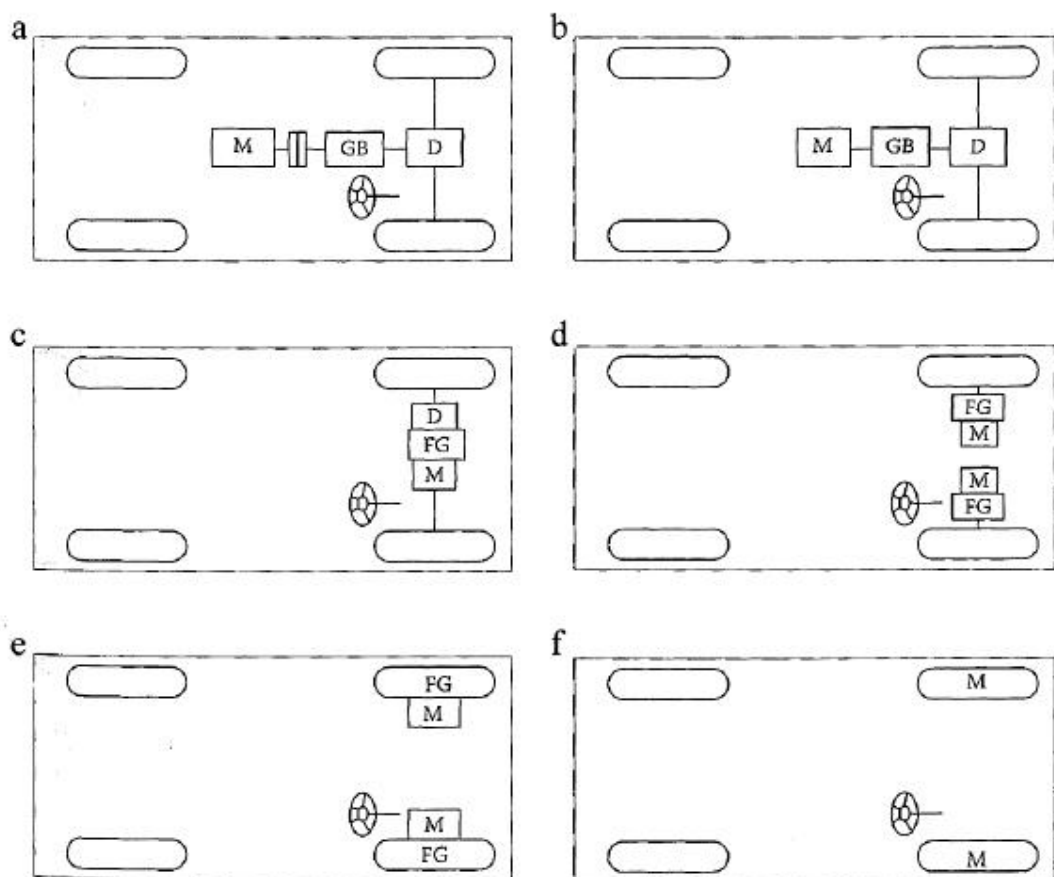


KUVIO 5. Täyssähkörakenteen periaatekuva

Sähköautolla on polttomoottoriautoon nähden lukuisa määrä huomattavia etuja, joista tärkein lienee se, että sähköautolla voidaan vähentää ilmaston lämpenemistä. Sähkömoottorin hyötysuhde on huomattavasti suurempi (jopa 95 %) kuin polttomoottorin (20-40 %), ja se kulkeekin huomattavasti pidemmälle samalla energiamäärällä. Sähköautojen hiilidioksidipäästöt ovat pienet verrattuna bensiini- tai dieselautoihin, mutta päästöjen määrä on suoraan suhteessa sähkön tuotantotapaan: pienillä sähköautoilla hiilidioksidipäästöt ovat noin 80–90 grammaa kilometrillä, kun uusilla polttomoottoriautoilla pyritään 130 gramman rajaan vuoteen 2013 mennessä. Jos sähkön tuottoon käytetään öljyä tai kivihiiltä, saattavat päästöt kuitenkin olla kokonaisuudessaan jopa polttomoottoriautoa isommat. (Motiva Oy, 2011)

Yksinkertaisen rakenteen ja mekaanisten osien vähyyden vuoksi sähköauto tarvitsee vain vähän huoltoa. Öljynvaihto tulee tarpeettomaksi, ja taas säästetään korjaamokäynneissä. Sähköautoon ei tarvita myöskään kytkintä ja vaihteistokin voidaan haluttaessa jättää pois, sillä kiihdytys on joka tapauksessa tasainen ja portaaton. Moottorin maksimivääntö on lisäksi käytössä heti nollanopeudesta asti, jolloin mahdollistetaan nopeat kiihdytykset ja liikkeellelähdöt.

Sähkömoottorin mekaaninen kytkentä perinteiseen voimansiirtoon voidaan toteuttaa monella tavalla, sen mukaan mikä sopii parhaiten suunniteltuun käyttökohteeseen. Kuviossa 6 on esitelty erilaisia voimansiirron kytkentäratkaisuja.

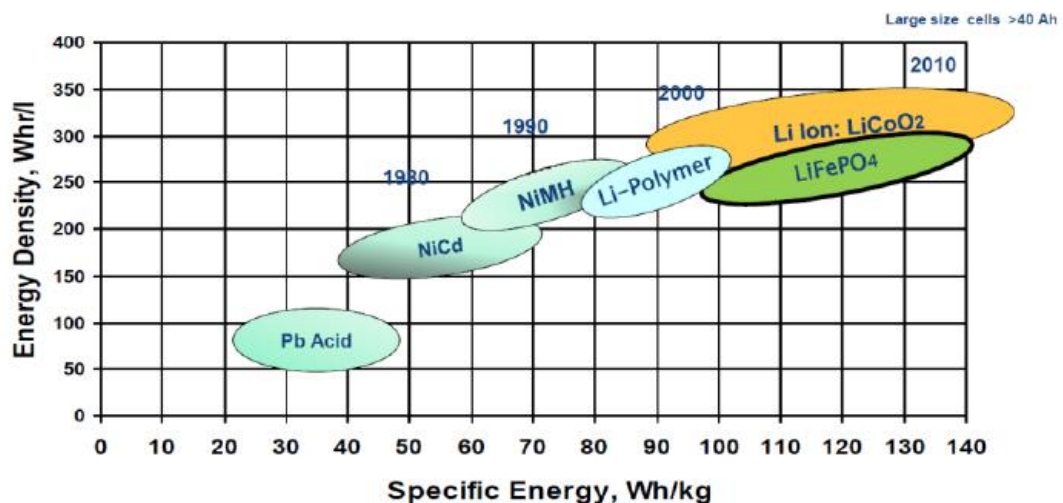


M: moottori  
GB: vaihdelaatikko  
D: tasauspyörästö  
FG: kiinteävälitys

KUVIO 6. Sähkömoottorin kytkentävaihtoehtoja (Ehsani & Gao, 2010, 534)

Kuvion 6 eri kytkentävaihtoehdot: a) polttomoottori korvattu sähkömoottorilla, muuten perinteinen rakenne, b) sama kuin a-kohta, mutta kytkin poistettu, c) moottori akselilla poikittain ja vaihdelaatikon tilalla kiinteä välitys, d) ei tasauspyörästöä ja molemmilla pyörillä oma moottori sekä kiinteä välitys, e) kiinteä välitys tehty planeettavaihteistolla, f) moottorit sijoitettu vetävien pyörien sisään (Ehsani & Gao, 2010, 534).

Kuten viime vuosisadan alussa, on sähköautojen suurin ongelma edelleen akkuteknologia, jos autolta tahdotaan pitkää kantamaa. Sähköautojen toimintasäde voi vaihdella 20 ja 400 km:n välillä akkuteknologian, akkujen määrän ja auton koon mukaan. Litiumpohjaiset akut ovat tällä hetkellä suosituimpia, niiden keveyden, suljetun rakenteen ja suuren energiatihedyn vuoksi (Tikka, 2010, 19).



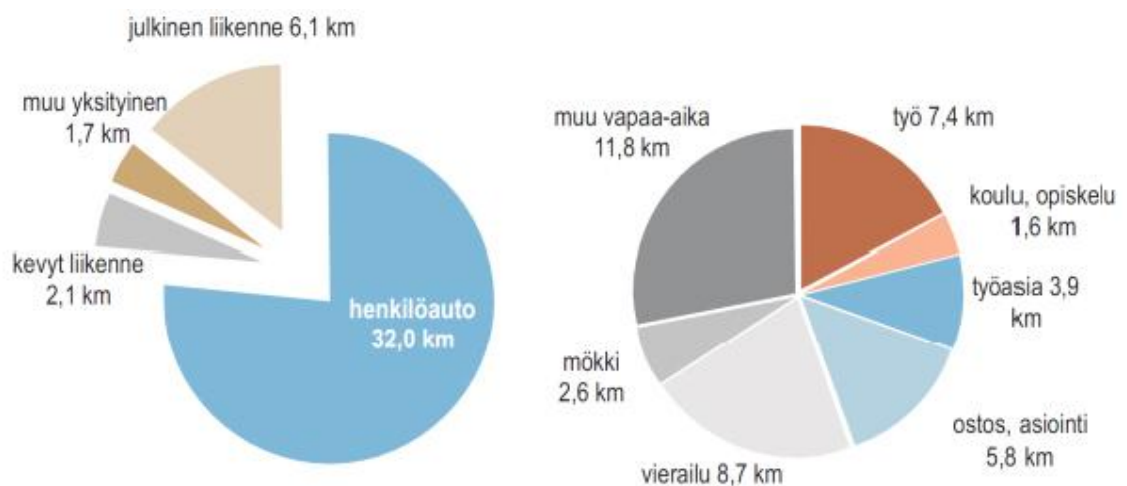
KUVIO 7. Eri akkuteknologioiden kehitysvuodet, pystyakseli kuvaa energiatihedystä ja vaaka-akseli teho-paino –suhdetta (Alatalo, 2010)

Kuten kuviosta 7 nähdään, edustivat litium-rauta-oksidi (LiFePO<sub>4</sub>) ja litium-koboltti-oksidi (LiCoO<sub>2</sub>) vuoden 2010 lopulla litiumpohjaisten akkujen huippua. Litiumpolymeeriakut ovat kuitenkin hintansa puolesta edellä mainittuja halvempia, mutta eivät kuitenkaan ole merkittävästi huonompi vaihtoehto energiatihedystensä puolesta. Polymeeriakkuja on myös helpommin saatavilla.

Vaikka akkuteknologiat rajoittavat etenkin muunnosautojen kantamaa, soveltuvat sähköautot silti erinomaisesti juuri kaupunkiajoon, joka sisältää



paljon liikkeellelähtöjä sekä jarrutuksia. Suomessa tyypilliset henkilöautolla ajettavat matkat rajoittuvat noin 30 kilometriin. Lisäksi henkilöautoilla suoritettujen matkojen osuus lisääntyy joka vuosi parilla prosentilla suhteessa muihin liikennevälineisiin (Henkilöliikennetutkimus, 2006).



KUVIO 8. Eri liikennevälineillä tehtävien matkojen keskipituus ja matkan kohde (Henkilöliikennetutkimus, 2006)

Etenkin muunnosautojen ongelmaksi muodostuvat pitkät ajomatkat, sillä muunnosautojen akuston kapasiteetti harvoin riittää yli muutaman kymmenen kilometrin matkaan. Akuston hinta kasvaa radikaalisti, jos kantamaa tarvitaan enemmän tai halutaan käyttää parempia akkuteknologioita. Koska Suomessa ei vielä ole suuritehoisia pikalatauspaikkoja, on akuston lataaminen pidemmällä matkoilla lähes mahdotonta. Kuvion 8 mukainen 32 km:n keskimatkakkin tyhjentää akuston lähes täysin, jolloin se vaatii lataukseen koko työpäivän, jos käytetään normaalia pistorasiaa tai auton lämmitystolppaa.

Sähköautoihin sisältyykin, ainakin nykyteknologialla, hyvien puolien lisäksi myös paljon haittoja. Ne eivät esimerkiksi ole aina käytettävissä eli yllättävät tilanteet, kuten onnettomuus- tai sairastapaukset, olisivat hankalia. Suomen sääolot ovat

myös ankarat, ja akuston lämmitys ja jäähdytys on vaikea suunnitella, kun kesän ja talven lämpötilaerot ovat kuumimpien helteiden ja kovimpien pakkasten välillä joissain osissa maata jopa 60°C.

### 2.2.3 ERA (Electric Raceabout)

Yksi suomalaisten taidonnäyte sähköautojen saralla on ehdottomasti ERA -sähköauto (kuva 3). Helsingin Metropolia ammattikorkeakoulu laittori vuoden 2007 lopulla toimeen projektin, jonka tarkoituksena oli rakentaa suorituskyyinen ja ekologinen sähköurheiluauto, joka tulisi sisältämään uusinta tekniikkaa jokaisen komponenttinsa osalta. Sen ultrakevyn rungon suunnittelu toteutettiin yhteistyönä Lahden ammattikorkeakoulun Muotoiluinstituutin kanssa. Teknisen suunnittelun pääosassa olivat Metropolian sähkö- ja koneinsinööriopiskelijat. Projektin vetäjänä toimi insinööri Sami Ruotsalainen, jolla oli henkilökohtaista kokemusta sähköautojen rakentamisesta vuosien takaa. Auton valmistuminen ajoitettiin vuoden 2009 X Prize -säätien järjestämään tuotekehityskilpailuun, joka kannustaa suunnittelijoita kehittämään energia- ja ympäristöystävällisiä ajoneuvoja. Kilpailun kolmessa pääsarjassa oli palkintoina yhteensä kymmenen miljoonaa dollaria. ERA selvisi karsinnoista helposti ja saavutti lopulta kisan toisen sijan, päihittäen lukuisan määrän suurten autovalmistajien prototyyppejä. Kisaan osallistui alunperin yhteensä 136 autoa. (Metropolia ammattikorkeakoulu, 2010; Ojanperä, 2010)



KUVA 3. ERA -sähköauto (Kuva: Metropolia, 2010)

ERA:n sähkömoottorit suunniteltiin Lappeenrannan teknillisessä korkeakoulussa ja valmistutettiin Axco Motorsilla. Jokainen pyörä sai oman suoravetoisen moottorinsa, joista jokainen pystyy 800 Nm:n huippuvääntömomenttiin. Moottorien yhteistehoksi saadaan hetkellisesti maksimissaan 370 kW. Autossa on kallis 550 kg:n litiumtitanaattiakusto, jonka kapasiteetti riittää 200 km:n ajoon. Tällä hetkellä ERA kiihtyy nolasta sataan kuudessa sekunnissa, pystyy 200 km/h huippunopeuteen ja kulkee yhdellä latauksella 200 kilometriä. ERA:n suoritearvot tulevat tulevaisuudessa vielä paranemaan, kun korin ja rungon mekaanista rakennetta sekä inverteriohjausta optimoidaan. (Metropolia ammattikorkeakoulu, 2010; Ojanperä, 2010)

ERA läpäisi katsastusprosessin lopulta 11.3.2011 useiden korjausten jälkeen. Toiseksi viimeisellä katsastuskerralla ainut estävä tekijä oli ollut käyttöliittymän tietokoneprosessorin, auton sammutuksen jälkeen päälle jäänyt, kellopulssi. Auto läpäisi katsastuksen sopivasti Michelin Challenge Bideandum –kisaa varten, jossa se kilpailee muiden nollapäästöisten autojen kanssa. Kisassa testataan hybridi- ja sähköautojen kulutusta ja akkukestoja kaupunkiajossa, joka suoritetaan Berliinin kaduilla. (Metropolia ammattikorkeakoulu, 2010)

### 2.3 Muunnossähköauto

Muunnossähköautolla tarkoitetaan autoa, joka konvertoidaan polttomoottoritekniikasta sähköversioon. Toisin kuin tehdasvalmisteiset sähköautot, muunnosautot joudutaan suunnittelemaan alkuperäisen polttomoottoriauton rungon keston ja tilavuuksien mukaan. Tarvittaessa rungon rakenteita joudutaan vahvistamaan, jos ei ole mahdollista käyttää vanhoja kovaa kuormitusta kestäviä tukipisteitä. On myös tärkeää ottaa huomioon, ettei auton sallittu omamassa ylity, kun polttomoottoritekniikka korvataan sähköisellä versiolla, sillä etenkin akkupaketin paino on huomattavan suuri. Sähkökonversiolla ajoneuvolle saadaan myös lisää elinkaarta, kun käyttökunnottomaksi menevä ja vanha polttomoottori voidaan korvata sähkömoottorikäytöllä.

Tällä hetkellä Suomessa on toteutettu muun muassa Toyota Corollan, Yariksen sekä Volvo 760 GLE:n sähkökonversiot. Ainakin edellä mainitut on hyväksytty tieliikennekäyttöön, joista viimeisimpänä eCorolla 2.0, joka läpäisi katsastuksen onnistuneesti 20.5.2011 (Sähköautot – Nyt!, 2011).

### 2.4 Muunnosautojen käyttöprofiili

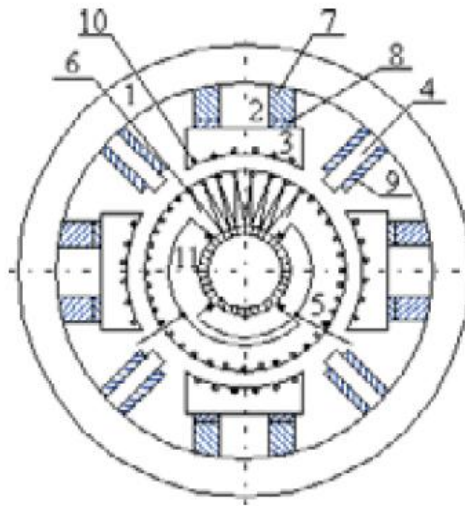
Kun sopiva muunnospohja on valittu, on seuraavaksi määriteltävä muunnosauton tuleva käyttöprofiili, eli millaisissa olosuhteissa autoa tullaan ajamaan ja mitä suoritearvoja siltä halutaan. Ensimmäisenä on hyvä päättää, tuleeko auton kyydissä olemaan vain kuljettaja vai muitakin matkustajia, jonka jälkeen voidaan miettiä mahdollista tavarankuljetuskykyä. Suomen oloissa tulisi myös päättää, tullaanko autoa käyttämään myös talvella, jolloin esimerkiksi akuston lämmitys nousee tärkeäksi tekijäksi. Kun edellä mainitut seikat ovat selvinneet, voidaan miettiä haluttua ajomatkaa yhdellä latauksella sekä autolta vaadittua huippunopeutta ja kiihtyvyyttä. Profiilin määrittäminen on todella tärkeää, sillä juuri sähköauton akusto asettaa todella niukat rajat poikkeavuuksille, ellei sitä reilusti ylimitoiteta.

### 3 SÄHKÖMOOTTORIT MUUNNOSÄHKÖAUTOIHIN

Muunnossähköauton moottorin valinnassa on otettava huomioon auton käyttöprofiili, eli ollaanko rakentamassa kenties ratakäyttöön tarkoitettua kiihdytysautoa vai tavalliseen kaupunki- ja taajama-alueen ajoon tarkoitettua arkiautoa. Sähkömoottorin valinta onkin kompromissi huippunopeuden, kiihtyvyyden ja mäennousukyvyn välillä. Etenkin muunnosautojen suunnittelua rajoittavaksi tekijäksi nousee myös moottorin koko, johon vaikuttaa sekin, mihin moottori halutaan muunnosautossa sijoittaa. Koska auton painojakaumat eivät saa muuttua alkuperäisestä, on sähkömoottorin paino tärkeää huomioida. Muunnosautoja toteutetaan usein joko omarahotteisesti tai erilaisten sponsorointien avulla, joten myös hinta voi rajoittaa moottorin valintavaihtoehtoja.

#### 3.1 DC-moottori

DC- eli tasavirtamoottorit (kuvio 9) ovat tähän mennessä olleet suosittuja vaihtoehtoja muunnosautoihin. Niiden ohjaaminen on yksinkertaista minkä vuoksi itse moottoriohjain on myös halpa. Muun muassa maailman nopeimmassa, katukäyttöön hyväksytyssä, White Zombie -sähköautossa (kuva 4) käytetään DC-moottoreita. Myös VR:n SR1 -sähköveturit soveltavat vielä tasavirtakonetekniikkaa, mutta uudemmat SR2 -veturit on varustettu nykyaikaisilla oikosulkumoottoreilla ja taajuusmuuttajilla (Sähkömoottori – teollisen yhteiskunnan käyttövoima, 2010).



Tasavirtakoneen osat: 1 staattorin kehä, 2 päänavan sydän, 3 napakenkä, 4 kääntönavan sydän, 5 roottorin eli ankkurin rautasydän, 6 roottori- eli ankkurikäänitys, 7 sivuvirtakäännitys, 8 sarjavirtakäännitys, 9 kääntönavan käänitys, 10 kompensointikäänitys, 11 kommutaattori harjoineen.

KUVIO 9. Tasavirtakoneen rakenne (Aura & Tonteri, 1994, 446)



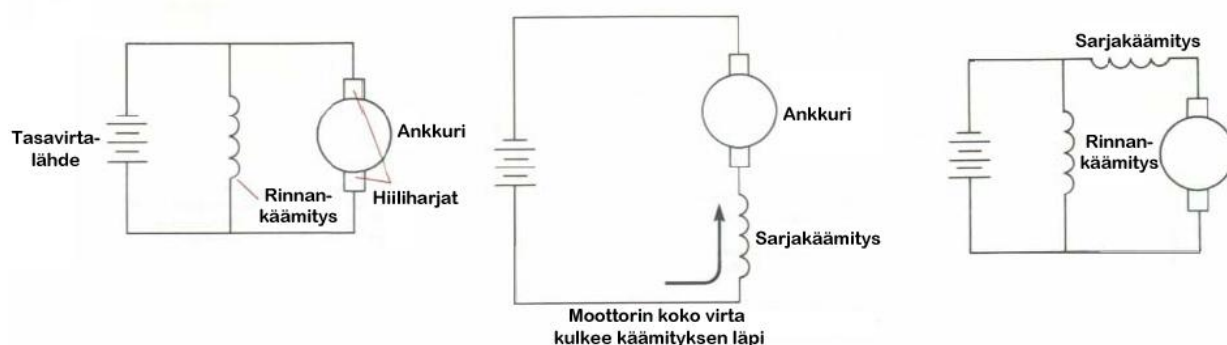
KUVA 4. White Zombie –sähköauto (Kuva: Carol Brown, 2010)

Vaikka DC-moottori saattaa kertahinnaltaan vaikuttaa edulliselta, ei se kuitenkaan pidemmän aikavälin tarkastelussa pärjää AC-moottorille. Hiiliharjallisten tasavirtakoneiden heikkoutena on juuri hiilien kuluminen, ja ne joudutaankin säännöllisesti vaihtamaan, käytön mukaan noin 2000 – 10000

kilometrin välein. Hiiliharjallista konetta ei voida tehdä rakenteeltaan suljetuksi, koska mekaanisen vaihtosuuntaajan komponenteista (hiiliharjat ja kommutaattori), irttoa pölyä, joka on saatava puhallettua pois moottorin sisältä. Jos pöly jäisi moottorin sisään, aiheuttaisi se ongelmia jäähdytyksessä sekä mekaanisten osien toiminnassa, pahimmillaan seurauksena voisi olla jopa jumitilanne. Huollon kalleuden takia teollisuus on pääasiassa luopunut tasavirtamoottoreiden käytöstä. Ajoneuvokäytössä DC-moottorien yhteydessä tarvitaan usein vaihteistoa, jos halutaan ylittää noin 60 km/h nopeudet, koska ne eivät kestä korkeita pyörimisnopeuksia roottorin kuparilangasta valmistetun urakäämityksen takia. Hyvän hyötysuhteen tehollinen kierroslukualue on lisäksi kapea, joten tasavirtakone kuluttaa paljon akkutehoa, jos vaihteistoa ei ole. (Hietalahti, 2010, 31; Sähköautot – Nyt!, 2010)

### 3.1.1 Hiiliharjalliset DC-moottorit

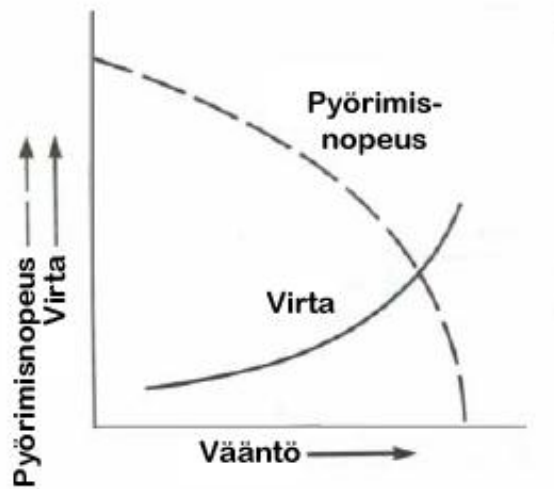
Kenttäkäämityt tasavirtamoottorit voidaan jakaa kolmeen alaluokkaan, eli rinnan- tai sarjakäämittyihin moottoreihin sekä niiden yhdistelmään eli kompondikäämittyihin moottoreihin. Kuviossa 10 on esitettyinä näiden moottorien periaatteelliset rakenteet.



KUVIO 10. Rinnan-, sarja- ja kompondikäämittyjen moottorien periaatekuvat (Sähkökäytöt, 2007, 4, muokattu)

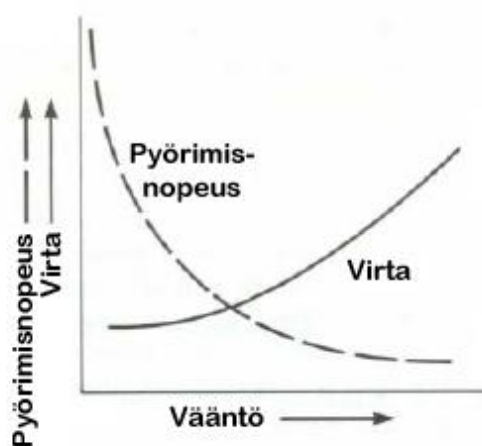
Rinnankäämityillä moottoreilla on hyvät pyörimisnopeuden säätöominaisuudet. Jos moottoria ei kuormiteta, se kiihdyttää maksiminopeuteensa. Kun moottoria kuormitetaan, nopeus laskee ja momentti kasvaa hetkellisesti kuvion 11

mukaisesti. Moottori ei kuitenkaan kuorman lisäämisen jälkeen pysty palaamaan samaan nopeuteen kuin ilman kuormaa. (Sähkökäytöt, 2007, 4)



KUVIO 11. Rinnankäämityksen moottorin pyörimisnopeus ja virta vääntömomentin funktiona (Sähkökäytöt, 2007, 4, muokattu)

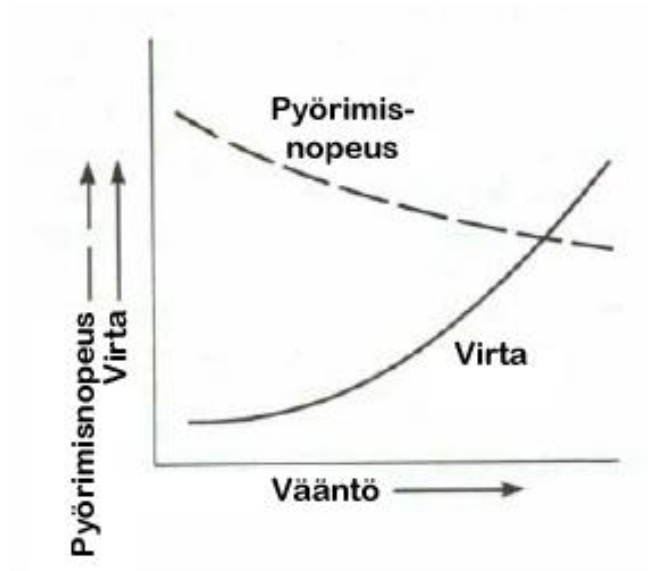
Sarjakäämitysten moottorien pyörimisnopeuden säätöominaisuudet ovat heikot. Jos kuormaa ei ole kytkettynä, moottori kasvattaa nopeuttaan hajoamispisteeseensä asti. Kun kuorma lisätään, kasvaa momentti huomattavasti ja pyörimisnopeus laskee. Käynnistysmomentti on sarjakäämityksillä moottoreilla rinnankäämittyä suurempi.



KUVIO 12. Sarjakäämityksen moottorin pyörimisnopeus ja virta vääntömomentin funktiona (Sähkökäytöt, 2007, 4, muokattu)



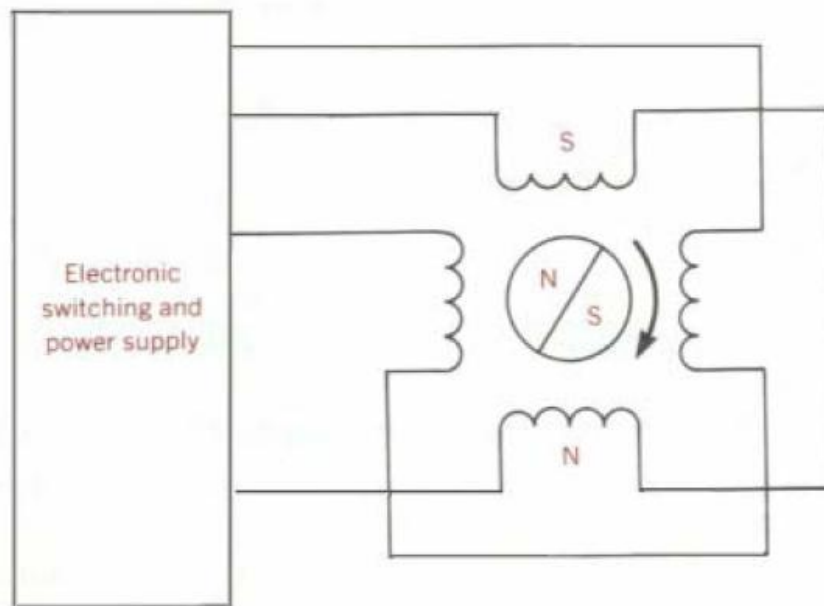
Kompoundimoottori on edellisiä huomattavasti kalliimpi, mutta sillä on molempien mallien parhaat ominaisuudet: korkea käynnistysmomentti ja hyvät säätöominaisuudet pyörimisnopeudelle (kuvio 13).



KUVIO 13. Yhdistelmä- eli kompondikäämityksen moottorin pyörimisnopeus ja virta vääntömomentin funktiona (Sähkökäytöt, 2007, 4, muokattu)

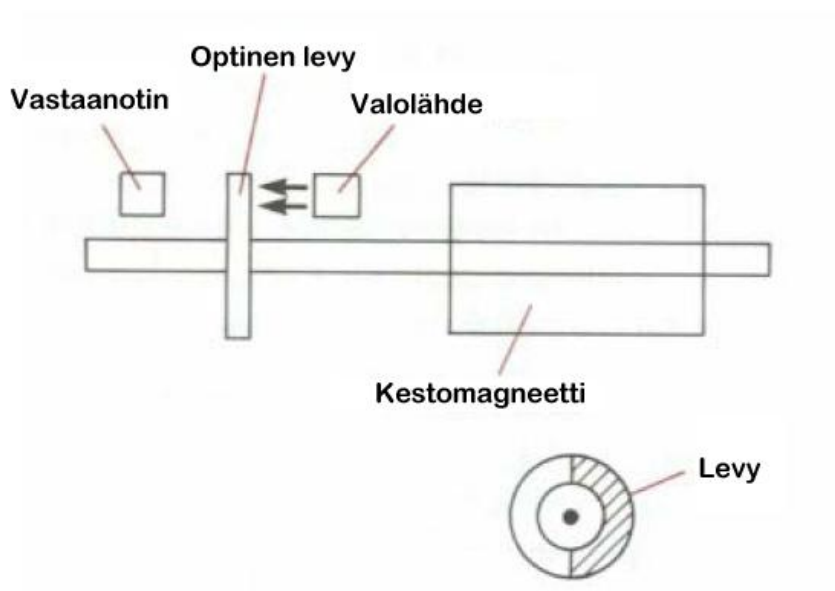
### 3.1.2 Hiiliharjattomat DC-moottorit

Hiiliharjaton tasasähkömoottori on yhdentyypinen kestopagneettimoottori, jossa kestopagneetit on kiinnitetty roottoriin ja sähkömagneetit staattoriin. Harjattomassa tasavirtakoneessa (kuvio 14) virta syötetään siis staattoriin, kun taas harjallisessa moottorissa virta syötetään hiiliharjojen kautta roottorin ankkurikäämitykseen. (Hietalahti, 2010, 32; Sähkökäytöt, 2010, 5)



KUVIO 14. Hiiliharjattoman moottorin periaatekuva (Hoekstra, 1992)

Hiiliharjattomat koneet tarvitsevat myös kommutointia. Yksi tapa toteuttaa elektroninen kommutointi on esitetty kuviossa 15. Moottorin roottoriin on kiinnitetty levy, joka pyörii valolähteen ja vastaanottimen välissä. Valosäteen katketessa, vastaanotin lähettää ohjaimelle tiedon vaihtaa jännitteen suuntaa. (Sähkökäytöt, 2010, 5)



KUVIO 15. Optisen kommutoinnin periaate (Hoekstra, 1992, muokattu)

Hiiliharjattomat moottorit ovat hyvin pitkäikäisiä ja luotettavia. Kun kommutointi on suunniteltu hyvin, todennäköisin syy moottorin hajoamiseen on roottoria

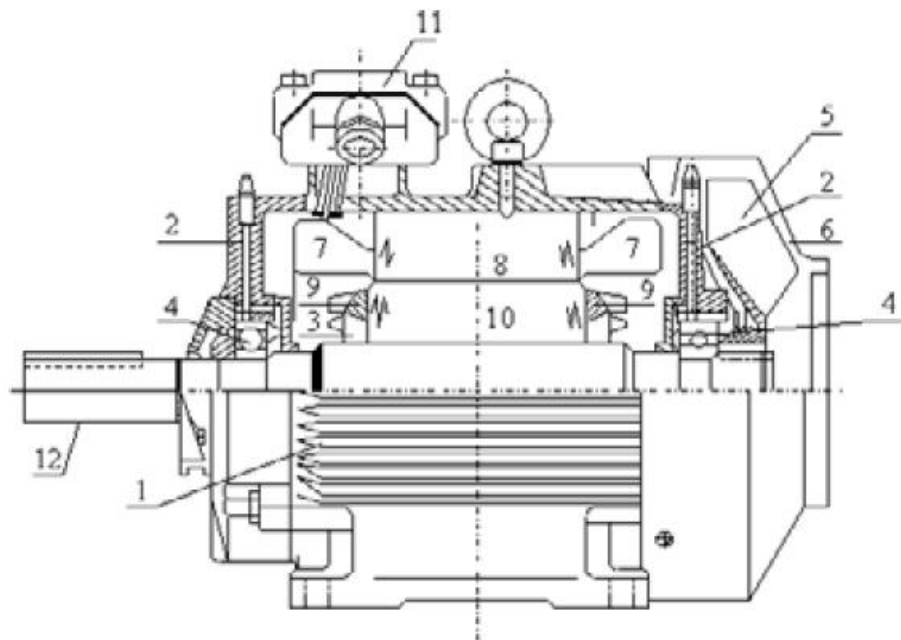
kannattelevan laakeroinnin pettäminen (Sähkökäytöt, 2010, 5–6). Harjaton moottori kestää ylikuormitusta paremmin ja on hiljaisempi kuin harjallinen. Hinnan ja rajallisen vakiotehoalueen sekä pyörimisnopeuden lisäksi harjallisen moottorin heikkoutena on käyttöturvallisuus. Vapaasti pyörivä tai tyhjäkäyvä moottori on jännitteinen, mikä on erityinen riski, kun moottori toimii nimellisnopeuden yläpuolella. Lisäksi invertterioikosulku voi saada moottorilla aikaan täydellisen jumitilanteen. (Hietalahti, 2010, 31)

### 3.2 AC-moottorit

Vaihtosähkömoottoreiden toiminta perustuu pyörivään magneettikenttään. Mikäli koneen roottori pyörii magneettikentän kanssa samalla nopeudella, kutsutaan sitä tahti- eli synkronikoneeksi, ja vastaavasti magneettikentän kanssa eri nopeutta pyörivä on epätahti- eli asynkronikone. Suurin osa (70–80 %) teollisuuden sähkömoottoreista on vaihtosähkömoottoreita (Sähkökäytöt, 2010, 7). Vaihtosähkömoottoreissa ei ole hiiliharjoja tai kommutaattoria. Niiden huoltoväli on myös tavallista pitempi. Vaihtosähkömoottoreilla voidaan toteuttaa peruuttaminen ja regeneroiva jarrutus tasavirtamoottoreita helpommin. Mahdollisuus vaihteettomuuteen korkean tehollisen kierroslukualueen takia sekä nestejäähdytys ovat myöskin selkeitä etuja, kun tarkastellaan ajoneuvokäyttöjä.

#### 3.2.1 Oikosulkumoottori

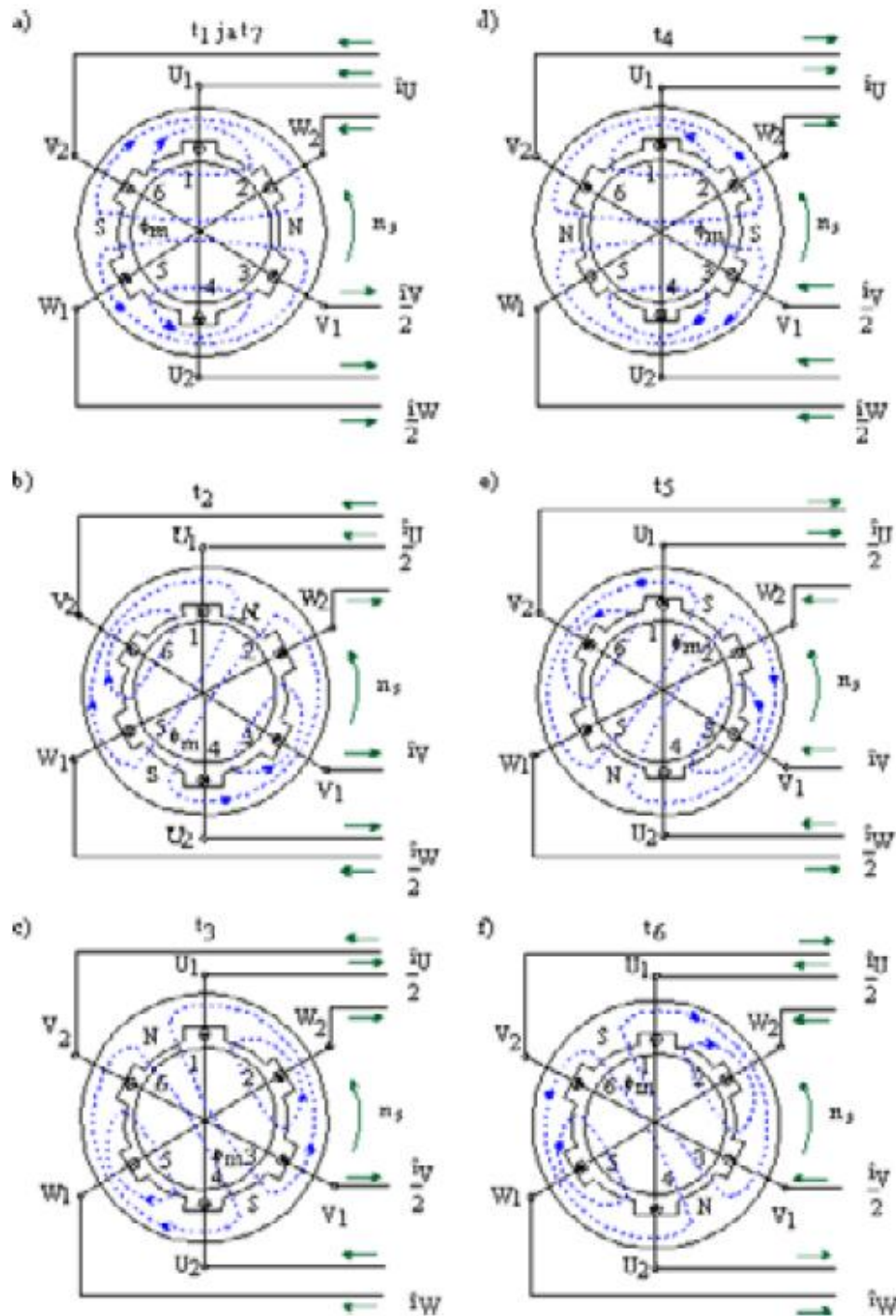
Oikosulku- eli induktiomoottori on kolmivaiheinen epätahtikone, jota teollisuudessa suositaan. Sen rakenne on yksinkertainen ja kestävä. Oikosulkumoottoreita rakentavat monet yritykset joka puolella maailmaa. Moottoreiden yleisimpiä kokoja onkin lähes aina saatavilla suoraan hyllystä.



Oikosulkumoottorin rakenne. 1 staattorin runko, 2 laakerikilvet, 3 roottori, 4 laakerit, 5 tuuletin, 6 tuulettimen suojus, 7 staattorikäämitys, 8 staattorin levypaketti, 9 roottorin käämitys, 10 roottorin levypaketti, 11 liitäntäkotelo, 12 akseli.

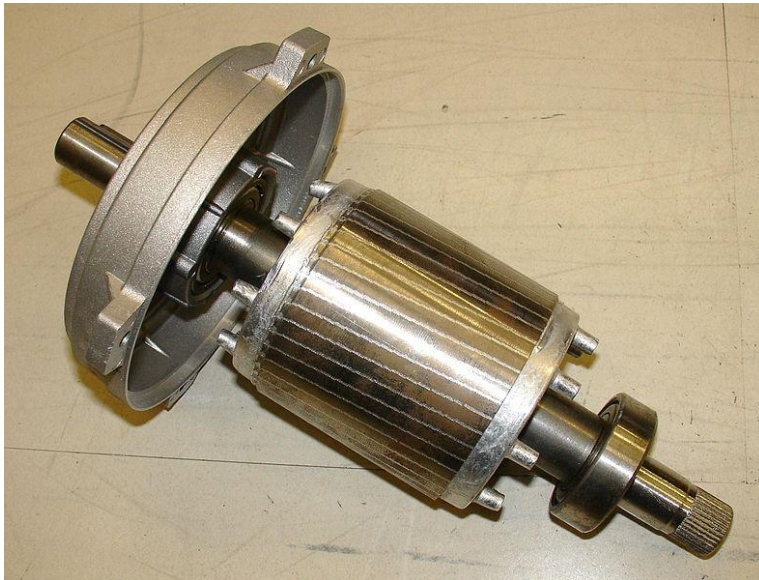
KUVIO 16. Tyypillisen oikosulkumoottorin rakenne (Aura & Tonteri 1997, 544)

Oikosulkukoneen roottorissa on metallisauvoista valmistettu oikosulkukäämitys, josta kone saa nimensäkin. Sauvat oikosuljetaan molemmista päistään renkaalla, jolloin rakennetta kutsutaan häkkikäämitykseksi (kuva 5). Kun kone pyörittää kuormaa, staattorin pyörivä magneettikenttä leikkaa roottorin metallisauvoja. Roottorin virtapiireihin indusoituu tällöin virta, joka magnetoi roottorin.



KUVIO 17. Kohdat a–f: pyörivä magneettikenttä ajanhetkillä  $t_1$ – $t_7$  (Aura & Tonteri 1994, 446)

Staattorin napojen magneettikenttä siirtyy eteenpäin napapari kerrallaan kuvion 17 mukaisesti. Tämä synnyttää kiertävän magneettikentän staattorin ja roottorin ilmapäliin. Oikosulkukone alkaa pyöriä, kun magnetoitunut roottori lähtee seuraamaan tätä pyörivää magneettikenttää. (Aura & Tonteri, 1994; Sähkömoottori – teollisen yhteiskunnan käyttövoima, 2010)



KUVA 5. Häkkikäämitty oikosulkukoneen roottori (Kuva: Sławek Skonieczny, 2008)

Oikosulkukoneiden pyörimisnopeus riippuu niiden napaluvusta. Koneet toimivat parhaiten napaluvun ollessa 2, 4 tai 6, eli napapariluvuilla 1, 2 ja 3. Tällöin vastaavat kiertokentän pyörimisnopeudet ovat 3000, 1500 ja 750 rpm. Kiertokentän pyörimisnopeus ( $n$ ) minuuttia kohden voidaan laskea kaavalla 1.

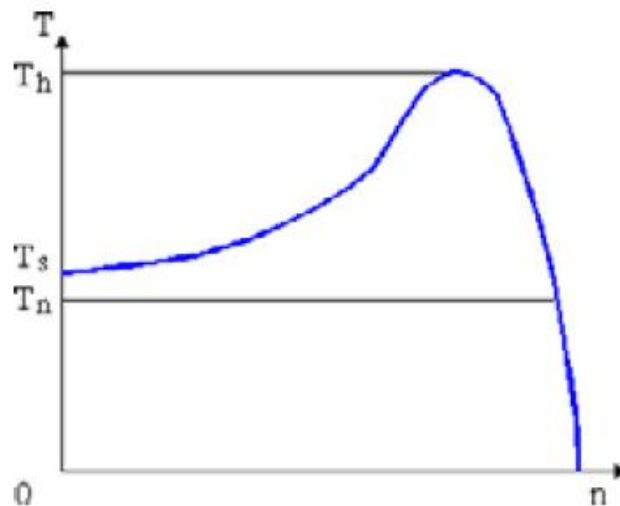
$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1)$$

jossa  $f$  on syötetyn vaihtosähkön taajuus ja  $p$  on napapariluku.

Todellisuudessa oikosulkukoneen roottorin magnetoinnissa tapahtuu tehohäviöitä, jotka aiheuttavat siihen jättämää, eli roottori ei pyöri yhtä nopeasti kuin kiertokenttä. Tästä syntyy nimitys epätahtimoottori. Koneen toiminnan kannalta jättämä on kuitenkin välttämätön, sillä moottori ei tuottaisi yhtään vääntömomenttia, jos roottori pyörisi yhtä nopeasti kuin staattorikenttä. Kun moottori on kytketty nimellisjännitteeseensä, voidaan sen nimellismomentti ( $T_n$ ) laskea kaavalla 2. (Sähkökäytöt 2010, 8)

$$T_n = \frac{P_n}{2 \cdot \pi \cdot n_n} \quad (2)$$

jossa  $P_n$  on moottorin mekaaninen nimellisteho ja  $n_n$  nimellispyörimisnopeus.



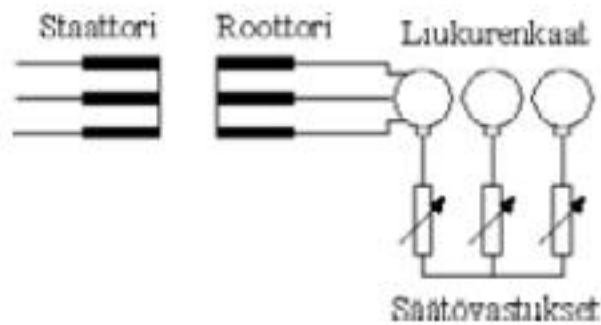
Oikosulkumoottorin tyypillinen vääntömomenttikäyrä.  $T_n$  on nimellismomentti,  $T_h$  on huippumomentti,  $T_s$  on käynnistysmomentti ja  $n$  on pyörimisnopeus.

KUVIO 18. Oikosulkumoottorin vääntömomenttikäyrä (Korpinen, 1997, 11)

Momenttia on mahdollista kasvattaa huippu- eli kippimomenttiin ( $T_{max}$ ) saakka. Kippimomentin ylittyessä moottori pysähtyy välittömästi. Useilla moottoreilla kippimomentti on jopa kolminkertainen nimellismomenttiin nähden, mutta ylikuormituksen varalta moottorien huippumomentti rajoitetaan yleensä kaksinkertaiseksi nimelliseen nähden (Hietalahti 2010, 39). Etenkin ajoneuvokäytössä moottorin pysähtyminen maantienopeuksissa aiheuttaisi vaaratilanteita. Oikosulkumoottorin ominaisuudet ja helppo saatavuus, ovat tehneet siitä suosituksen vaihtoehtona muunnossähköautoihin.

### 3.2.2 Liukurengasmoottori

Toisin kuin oikosulkumoottorin häkkikäämitys, liukurengasmoottorin roottorikäämityksen toiset päät on kytketty akselilla oleviin liukurenkaisiin, joita liukuharjat laahaavat (Korpinen, 1997, 9). Liukuharjoihin on kytketty ulkopuolinen vastus, jonka vastusarvoa voidaan yleensä vapaasti säätää haluttuun arvoon. Vastuksen säätö vaikuttaa koneen ominaisuuksiin. Roottorikäämit eivät ole liukurengasmoottorissa yhteydessä roottorirautaan. Liukurengasmoottori on myöskin epätahtikone.

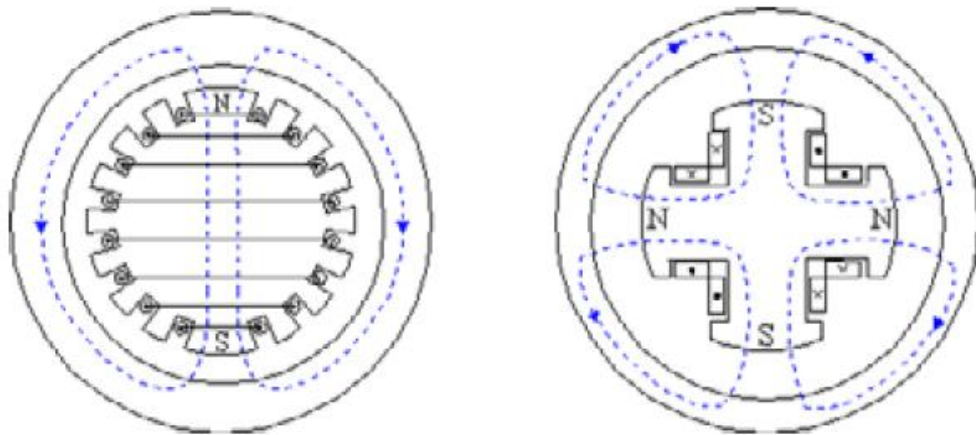


KUVIO 19. Liukurengasmootorin periaatekuva (Korpinen, 1997, 9)

### 3.2.3 Vierasmagnetoitu tahtikone

Kuten nimestä voi päätellä, tahtimootorit pyörivät tahdissa koneen sisäisen magneettikentän kanssa. Tällöin ne ovat myös tahdissa sitä syöttävän verkon kanssa. Tästä johtuen tahtikoneet soveltuvat toimimaan generaattorina paremmin kuin muut sähkökonetyypit. Pääasiallinen rakenteellinen ero epätahtikoneisiin nähden on roottorissa. Tahtikoneessa on ulkoisella tasasähkölähteellä magnetoitu napapyörä, kun taas oikosulkumoottorissa käytettiin oikosuljettua häkkikäämitystä (Hietalahti, 2010, 44). Ajoneuvokäytössä vierasmagnetoitua tahtikonetta voidaan käyttää sarjahybridirakenteessa generaattorina, mutta varsinaiset moottorikäytöt ovat megawattiluokkaa. Teollisuuden suurimmat moottorit ovatkin usein tahtikoneita, sillä ne soveltuvat raskaisiin käyttöihin, joissa vaaditaan suurta vääntömomenttia, hyviä kentänheikennysominaisuuksia sekä tasaista pyörimisnopeutta. Hitaasti käyvät tahtikoneet ovat usein avonapaisia ja nopeasti käyvät puolestaan umpinapaisia. (Sähkökäytöt, 2007, 7–8).





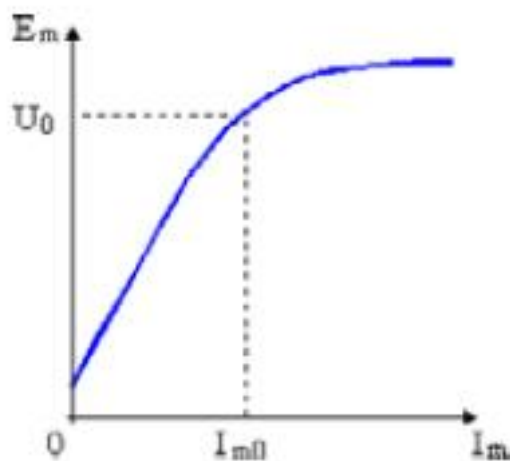
KUVIO 20. Vasemmalla 2-napainen umpinapamootori ja oikealla 4-napainen avonapamootori (Match & Morgan, 1987, 574)

Tahtikoneiden nopeutta voidaan säätää, kaavan 3 mukaisesti, muuttamalla syöttötaajuutta ( $f$ ) ja pyörimisnopeus pysyy vakiona kuormasta riippumatta.

$$f = \frac{n_s}{p} \quad (3)$$

jossa  $n_s$  on napapyörän pyörimisnopeus ja  $p$  koneen napapariluku.

Kun napapyörää aletaan pyörittää ulkoisella voimakoneella, alkaa staattoriin indusoitua vaihtojännitettä, joka käyttäytyy kuvion 21 mukaisesti magnetoimisvirran suhteen.

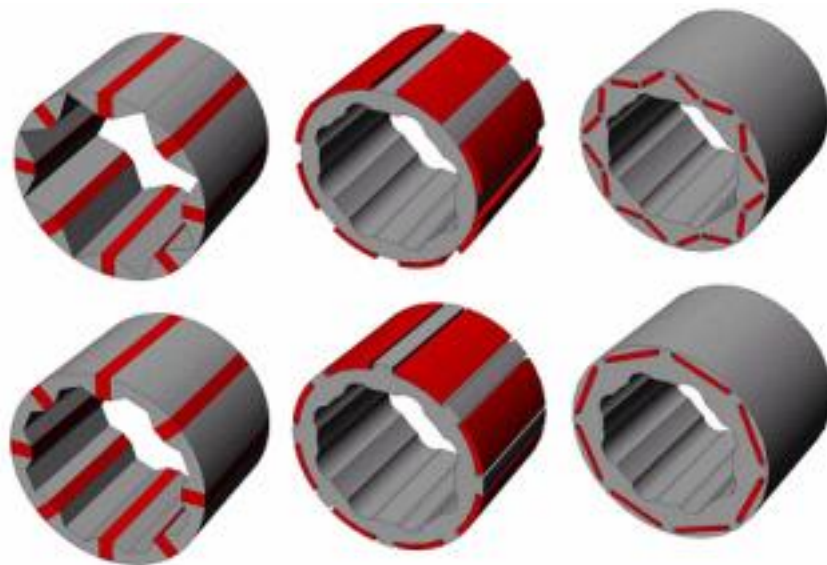


KUVIO 21. Tahtikoneen lähtejännite magnetoimisvirran funktiona (Korpinen, 1997, 4)

Aluksi magnetointikäämin magnetomotorinen voima kuluu ilmapälin reluktanssissa. Raudan vuontiheys on alussa hyvin pieni, joten käyrä kasvaa lineaarisesti. Rauta alkaa kuitenkin kyllästyä magnetointivirran kasvaessa ja jännitteen kasvu hidastuu. (Korpinen, 1997, 4)

### 3.2.4 Kestomagneettitahtikone

Riippuen missä suunnassa magneettivuo vaikuttaa akselilinjaan nähden, kestomagneettimoottoreita kutsutaan joko radiaali- tai aksaalivuokoneiksi. Koska konetta ei tarvitse magnetoida sähkövirralla, ja sen roottori on pääosin häviötön, on sen tehokerroin huomattavasti parempi kuin perinteisellä induktiokoneella. Kestomagneettitahtikoneet ovat jaettavissa pintamagneettikoneisiin ja upotetuilla magneeteilla varustettuihin koneisiin.



KUVIO 22. Erilaisia kestomagneettien asennustapoja roottorille (Thomas Finken 2010)

Upoasennetut magneetit sisältävä kone kestää hyvin mekaanista rasitusta ja sillä on melko laaja kentänheikennysalue. Pinta-asennetuilla magneeteilla varustettu kone on magneettisesti symmetrisempi, ja rakenne on käytössä yleisesti muun muassa servomoottoreissa. Mikäli konetta joudutaan käyttämään

nimellishopeutta suuremmilla alueilla, on taajuusmuuttajan estettä jännitteen liiallinen nousu suurella demagnetoivalla virralla, jolloin moottorin tuottama vääntömomentti putoaa nopeasti. Pintamagneetein varustetun koneen kentänheikennysominaisuudet ovat siis kestopagneettikoneille tyypilliseen tapaan huonot. Koska kestopagneettikoneen ominaisuudet eivät huonone napaluvun kasvaessa samalla tavalla kuin oikosulkukoneella, saavutetaan niillä suuria vääntömomenttitiheyksiä pienillä kierrosluvuilla, koska staattoriselälle tarvitaan vain vähän tilaa, jolloin roottori voi olla mahdollisimman iso. Tästä johtuen kestopagneettikoneet ovatkin olleet tutkimuksen alla ajoneuvokäyttöön ja Toyota käyttää Prius-hybridiautossaan kestopagneettitahtikonetta, joka muistuttaa osittain synkroni- eli tahtireluktanssikonetta.(Liu & Peng 2006; Hietalahti 2010, 47–50)



KUVA 6. EVO Electricin ajoneuvokäyttöön suunniteltu aksaaliuokone, joka tuottaa jopa 600 Nm:n vääntömomentin liikkeellelähdössä (EVO Electric 2010)

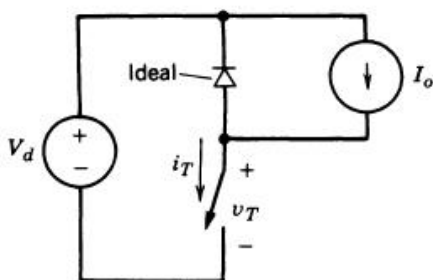
Kestopagneettimoottorien hyödyntäminen muunnossähköautoihin olisi fyysisten mittojen ja suoritearvojen perusteella erittäin kannattavaa, mutta kuten tasavirtamoottoreista kertovassa luvussa mainittiin, ovat kestopagneettimoottorit erittäin kalliita komponentteja. Sen takia vain suurten autovalmistajien on taloudellisesti järkevää hyödyntää niitä, koska massatuotanto vähentää autokohtaisia kustannuseriä merkittävästi.

## 4 SÄHKÖMOOTTORIN OHJAUS

Teollisuudessa suurta osaa moottoreista ohjaa vain syöttävä verkko, jolloin moottori pyörii käytännössä aina vakionopeudella eikä sitä pystytä jälkikäteen säätämään. Mikäli ohjaamatonta moottoria, esimerkiksi normaalia oikosulkukonetta, haluttaisiin käyttää nimellisarvoista poikkeavalla tavalla, olisi syöttävän verkon jännitettä ja/tai taajuutta muutettava, joka on käytännössä mahdotonta. Moottoriohjaimella pystytäänkin sähkömoottorikäyttö spesifioimaan paremmin sille tarkoitettuun prosessiin sopivaksi. Koska ajoneuvokäyttö sisältää hyvin erilaisia kuormitustilanteita, on moottorin ohjaaminen välttämätöntä.

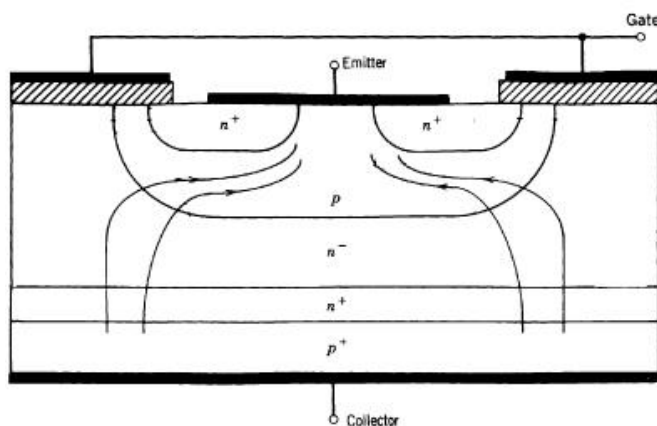
### 4.1 DC-moottorin ohjaus

Tasavirtamoottorien säätö helpottui merkittävästi tyristoriteknikan keksimisen jälkeen. Säädön tarkkuus oli aina 1990-luvun alkuun asti parempi kuin kiertokenttäkoneilla. Tasavirtamoottorin ohjaaminen on periaatteeltaan huomattavasti vaihtosähkökoneita helpompi. Pyörimisnopeutta ohjataan pääasiassa ankkurijännitteellä. Ankkurivirta vaikuttaa puolestaan suoraan vääntömomentin suuruuteen. Rinnankäämittyjen ja vierasmagnetoitujen tasavirtamoottorien pyörimisnopeudessa ei tapahdu suuria muutoksia, vaikka kuormitusta kasvatettaisiin. Sarjakäämitetyn moottorin pyörimisnopeus puolestaan laskee samassa tilanteessa merkittävästi, ja pienillä pyörimisnopeuksilla moottori ryntää, jos kuormitus on pieni. Pieni tehoinen moottoriohjain, periaatteessa tasavirtakatkoja (kuvio 23), koostuu yleensä GTO-tyristoreista (Gate Turn-off). Kuvion 23 mukaisella katkojalla ei ole mahdollista toteuttaa pyörimissuunnan vaihtoa. (Aura & Tonteri 1986)



KUVIO 23. Yksinkertainen tasavirtakatkijan päävirtapiiri (Lander 1987)

Keskiteholuokan ohjaimissa käytetään nykyisin paljon IGBT-transistoreita (Insulated Gate Bipolar Transistor), jonka rakenne on esitetty kuviossa 24. Vastaavasti suuritehoisiin sovelluksiin käytetään MOSFET-transistoreita (Metal-oxide-semiconductor Field Effect Transistor). Mitä korkeammalle kytkentätaajuus nousee sitä enemmän johtotilan häviöitä syntyy. Tehokomponenttien häviöistä johtuen, moottorihjaimen jäähdytys on suunniteltava hyvin, ja usein tarvitaankin ulkoisia jäähdytyslementtejä. (Tehoelektroniikan perusteet 2010, 19)



KUVIO 23. IGBT-transistorin puolijohderakenne (Mohan, Undeland & Robbins 1995)

Tasavirtamoottorien ohjaustapa on nimeltään PWM (Pulse Width Modulation), josta kerrotaan tarkemmin vaihtosähkömoottorien ohjaustavoissa. Ajoneuvokäyttöön tarkoitetut tasavirtamoottorien ohjaimet ovat lähes poikkeuksetta PWM-ohjattuja ja sisältävät IGBT- tai MOSFET-tekniikan.



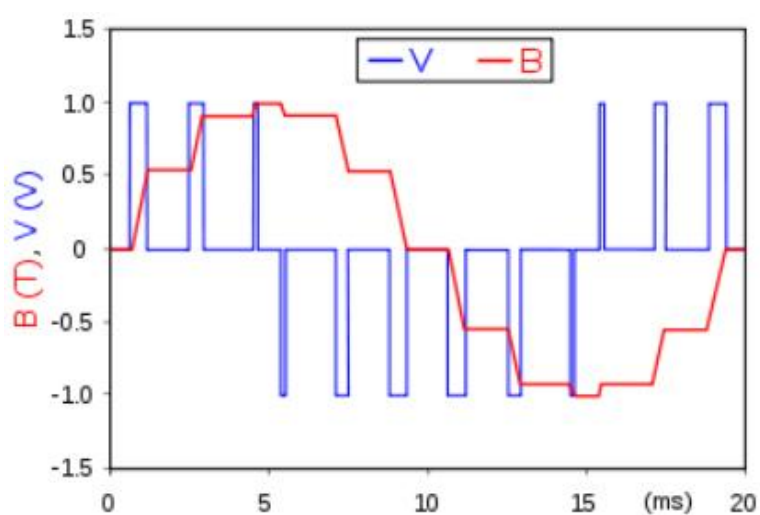
KUVA 7. Curtiksen valmistama, pienikokoisten muunnosautojen DC-moottorin ohjaukseen soveltuva, moottoriohjain (Kuva: Curtis Instruments 2010)

#### 4.2 AC-moottorin ohjaus

Vaihtosähkökoneiden ohjaustekniikat ovat kehittyneet viime vuosikymmeninä isoin harppauksin. Suomalaiset ovat olleet alusti asti tiiviisti mukana oikosulkumoottorin pyörimisnopeussäädön kehittämisessä. Kehityksen kasvoina, 1970-luvulta alkaen, toimi Oy Strömberg AB:n Martti Harmoinen. Hänen haaveenaan oli kehittää oikosulkumoottorista yhtä helposti säädettävä kuin tasavirtamoottorista. Harmoisen pyörimisnopeussäädön ensisovellus oli Helsingin metrojunien sähkömoottorikäytöt, jotka ovat edelleen toiminnassa. Helsingin metro olikin maailman ensimmäinen metro, joka hyödynti AC-käyttöä. 1990-luvulla kiertokenttäkoneiden säätöominaisuudet kohosivat tarkkuudeltaan tasavirtamoottorien rinnalle ja lopulta niiden ohi. Vaihtosähkömoottorin ohjauslaitetta kutsutaan yleisesti taajuusmuuttajaksi, taajuuden muuttajaksi, invertteriksi tai moottorivaihtosuuntaajaksi. Yleisesti ottaen, taajuusmuuttajalla tarkoitetaan laitetta, joka ottaa sisään vaihtosähköä, tasasuuntaa sen välipiirissä ja vaihtosuuntaa sen uudelleen moottorille. Invertteri puolestaan sisältää vain sitä syöttävän tasasähkön vaihtosuuntauksen. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto: Taajuusmuuttaja 2010)

#### 4.2.1 Pulssinleveysmodulointi

Pulssinleveysmoduloinissa tasajännitteestä muodostetaan elektronisten kytkinten avulla tietyn taajuista tasajännitettä. Yhden vaiheen jännite on aina huippuarvossaan tai nolla. Kahta vaihetta tarkasteltaessa, tasajännite muodostaa eri levyisiä pulsseja, jotka ovat nollatason molemmilla puolilla. Karkealta muodoltaan ja tehollisesti pulssimainen tasajännite muistuttaa vaihtojännitettä. Kun pulssijono suodatetaan oikein, jännite on sinimuotoista. Jännitettä voidaan muuttaa vaihtelemalla pulssien leveyttä. Vastaavasti pulssien jaksonaikaa muuttamalla voidaan saavuttaa haettu taajuus (Kokkonen 2007, 3–10). Moduloinnin periaate ja käyrämuotojen käyttäytyminen on esitetty kuviossa 24. Tasavirtamoottorien ohjaaminen perustuu ajoneuvokäytöissä nimenomaan pulssinleveysmodulointiin.



KUVIO 24. Pulssinleveysmoduloinnin toiminta (Netrino LLC 2011)

Kuviossa 24 sinisellä näkyvä käyrä (V) on vaiheiden välinen jännite, joka on moduloitu pulssisarjaksi, josta seuraa punaisen käyrän (B) karkeasti sinimuotoinen aalto. Aaltomuotoa voidaan parantaa pulssien leveyttä ja lukumäärää muuttamalla.

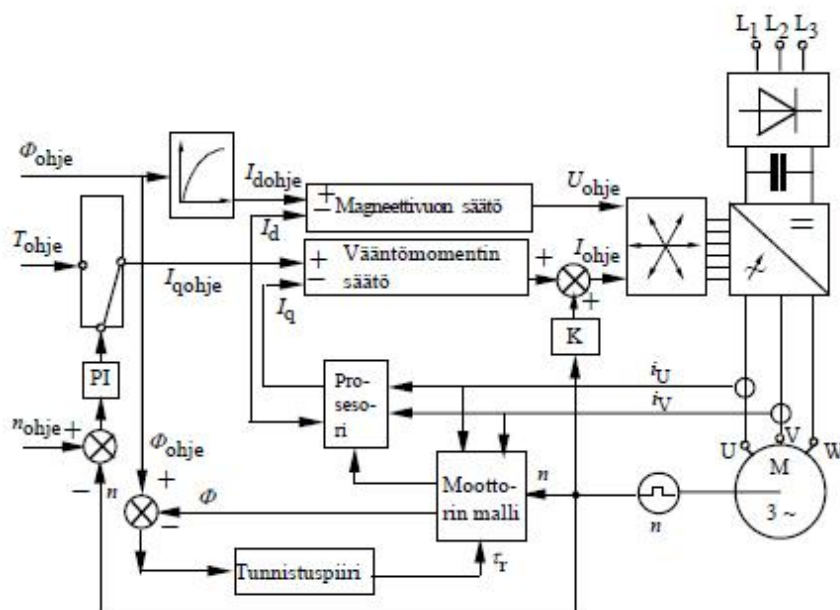
#### 4.2.2 Skalaariohjaus- ja säätö

Skalaariohjaus- ja säätö soveltuvat pääasiallisesti käyttöihin, joiden dynamiikkavaatimukset ovat vähäiset. Jännite ja taajuus ovat skalaarisuureita,





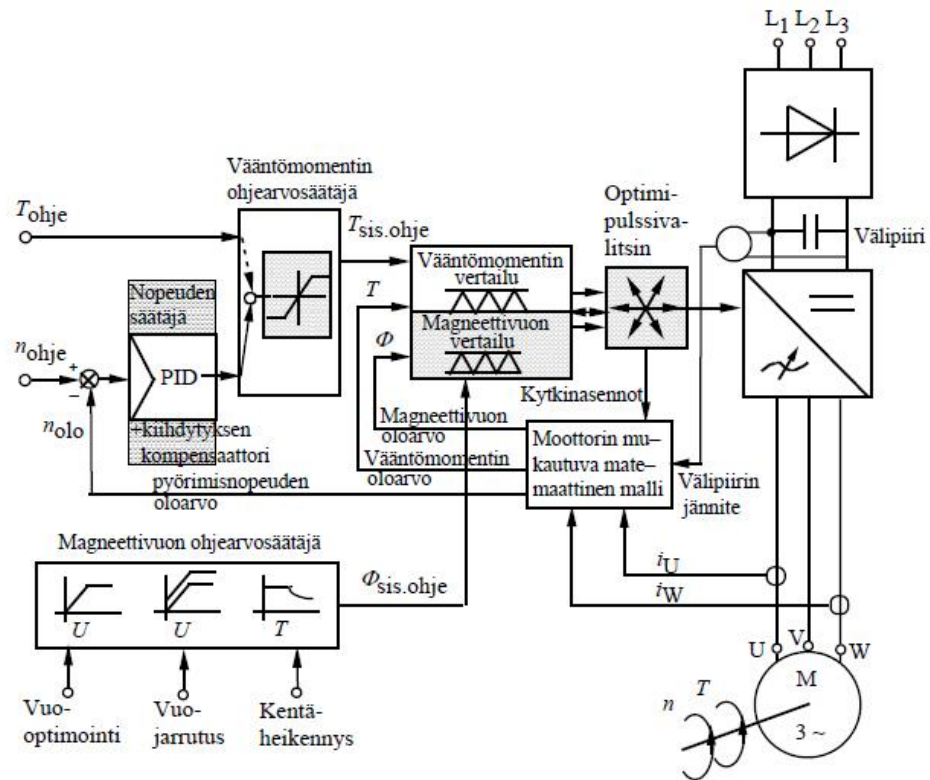




KUVIO 27. Vektorisäädön lohkokaavio (ABB TTT-käsikirja, 2007, 25)

#### 4.2.4 DTC-säätö

DTC (Direct Torque Control) eli suora vääntömomenttisäätö ohjaa suoraan moottorin vääntömomenttia ja pyörimisnopeutta. DTC on nykyisin käytetyistä ohjausmenetelmistä käytetyin ja kehittynein. Periaatteessa moottorin annetaan kehittää haluttu pyörimisnopeus ja vääntömomentti niin nopeasti kuin mahdollista. Moottorin syöttävä jännite ei muutostiloissa olekaan sinimuotoinen. Moottorin virta ja invertterin tasajännitevälipiirin jännite mitataan ja syötetään moottorin matemaattiseen malliin, joka on adaptiivinen eli mukautuva. Prosessori laskee vuon ja vääntömomentin oloarvot, joita komparaattorit vertailevat ohjearvoihin. Optimipulssin valitsin saa komparaattoreilta tiedon tarvittavien kytkentämuutosten tekemiseen. Kun moottori saavuttaa jatkuvuustilan, eli pyörimisnopeus on vakio, muuttuu syöttöjännite sinimuotoiseksi. DTC:n ja PWM:n erona on, että pulssinleveysmodulaatiossa invertteri pyrkii syöttämään moottoria aina sinimuotoisella jännitteellä. (ABB TTT-käsikirja, 2007, 25; Kokkonen, 2007, 32–33)



KUVIO 28. Suoran vääntömomentti- eli DTC-säädön lohkokaaavio (ABB TTT-käsikirja, 2007, 26)

## 5 EPORSCHE 928 S4

### 5.1 Auton ja opinnäytetyöprojektin tausta

Opinnäytetyön taustalla on käytännön muunnosprojekti, jossa yksityishenkilön omistama, 1988-vuosimallin, Porsche 928 S4 Automatic (kuva 8), on tarkoitus muuntaa sähkökäyttöiseksi. Projektissa oli mukana myös muita neljännen vuoden insinööriopiskelijoita, joilla oli opinnäytetyöaiheina muun muassa Porschen akkujärjestelmän ja regeneratiivisen jarrutuksen suunnittelu. Kaiken kaikkiaan Porsche-projektista tehdään viisi opinnäytetyötä.




KUVA 8. Porsche 928 S4 Automatic (Kuva: Antti Syvänen, 2010)

Porsche 928 on kohtalaisen hyvin soveltuva sähköautomuunnokseksi. Auton painojakauma on 50/50. Moottori ja invertteri on ratkaisussamme sijoitettu auton takapäähän, jolloin niiden ja akuston tuomat suuret massat on helppo pitää 50/50 tasapainossa. Koska kyseisen mallin tuotanto on sijoittunut pääosin ennen 90-lukua, on "vanhempia" malleja saatavilla paljon. Ennen 90-luvun alkua rekisteröityjen autojen viranomais määräykset, kuten EMC-testaus eivät ole niin tiukasti säädeltyjä, jolloin auto on helpompi saada katsastettua ja liikenteeseen.

Porsche 928 on GT-luokan auto, jota valmistettiin vuosina 1978–1995. Valmistusaikanaan 928 oli Porschen kallein malli. Auton muotoilu muistuttaa haita ja 80-luvun lopussa se oli maailman nopein tuotantoauto. Kyseiselle mallille löytyy Suomestakin kattava harrastajapohja, joilta löytyy tietotaitoa mahdollisten ongelmien ratkaisuun. Alla olevassa taulukossa 1 on esiteltynä auton tarkemmat tekniset tiedot.

TAULUKKO 1. Auton tiedot (928intl.com, 2011, muokattu)

Merkki ja malli	<b>PORSCHE</b> 928 S4 automatic	
Kokonaismassa	1900 kg	
Omamassa	1590 kg	
Sallittu etuakselimassa	920 kg	
Sallittu taka-akselimassa	1100 kg	
Omamassa etuakselilla	50 %	
Akseliväli	2500 mm	
Ilmanvastuskerroin	0,3	
Otsapinta-ala	1,96 m <sup>2</sup>	
Vannekoko	15 "	
Renkaan leveys	195 mm	
Renkaan vierinvastus	0,013	
Voimansiirron hyötysuhde	0,9	
Polttomoottorin massa	264 kg	
Tavaratilan tilavuus	100 l	
Teho	320 hv (@6000rpm)	
Vääntö	430 Nm (@3000rpm)	
Kulutus	19,3 l/100km (city)	
Kiihtyvyys (0...100km/h)	6,6 s	
Huippunopeus	265 km/h	

Kuten taulukosta 1 voidaan nähdä, on auton alkuperäinen V8-moottori todella massiivinen, painaen 264kg. Täten painavan polttomoottorin poistaminen mahdollistaa sen, että auton etupäähän voidaan sijoittaa iso akkupaketti. Auton painojakauman on kuitenkin pysyttävä samana, eli puolet painosta etupäässä ja puolet takana, joten on viisainta sijoittaa moottori ja invertteri auton takaosaan.

Auto kuluttaa kaupunkiajossa huimat 19,3 litraa sadalla kilometrillä. Esimerkiksi Porschen kotimaassa, Saksassa, autoille on asetettu tiukat kulutusrajat, ja

928:lla ei nykypäivänä saisi alkuperäisenä polttomoottoriversiona ajaa suurimmassa osassa maata.

Porsche sijaitsee fyysisesti Tampereen Ruskossa tehdashallissa, josta Tredea Oy on vuokrannut osan Electricity-hankkeen käyttöön. Hankkeen tarkoituksena on edistää Tampereen ja lähialueiden yritys- ja oppilaitostoimintaa sähköajoneuvojen kehityksessä. Ruskossa sijaitsevaa tilaa kutsutaan nimellä Tampereen Sähköajoneuvokeskus. Suurin osa viikottaisista opinnäytetyöpalavereista käytiin Ruskon tiloissa.

## 5.2 Tehonsiirtojärjestelmän mitoitus

Sähkömoottoria ja moottoriohjainta mitoittaessa on ensin selvitettävä auton tehotarpeet eri ajotilanteissa. Kuten luvussa 2.3 mainittiin, on auton käyttöprofiili tärkeä määrittää, jotta sähkökäyttö voidaan mitoittaa siihen riittäväksi. Auton omamassa on taulukon 1 mukaan 1590 kg, mutta Porsche punnittiin teollisuusva'alla 1532 kg:n painoiseksi. Oletetaan, että sähkökäyttö tulee painamaan saman verran kuin poistettu polttomoottoritekniikka. Auto on nelipaikkainen, mutta takana olevat istuinitilat ovat huomattavan pienet, joten oletetaan auton kyydissä olevan maksimissaan kaksi 80 kg:n painoista aikuista, joilla on maksimissaan 50 kg:n edestä matkatavaraa mukanaan.

$$m_v = m_{oma} + m_{mat} + m_{tav} \quad (4)$$

jossa  $m_v$  on ajoneuvon kokonaismassa,  $m_{oma}$  auton omamassa,  $m_{mat}$  matkustajien kokonaismassa ja  $m_{tav}$  kuljetettavien tavaroiden massa.

Tällöin auton kokonaismassaksi saadaan:

$$m = 1532\text{kg} + (2 * 80)\text{kg} + 50\text{kg} = 1742\text{kg}$$

Auton liikettä vastustavat voimat ovat gravitaatiovoima, vierintävastus sekä ilmanvastus. Kun vastustavat voimat vähennetään auton liikkeelle saavasta voimasta, selviää onko autolla kiihtyvyyttä vai hidastuvuutta.

### 5.2.1 Gravitaatiovoima

Gravitaatiovoiman ( $F_g$ ) etumerkki määräytyy sen mukaan onko ajoneuvo etenemässä ylämäkeen vai alamäkeen. Ylämäkiosuuksilla moottoritehoa tarvitaan ajoneuvon potentiaalienergian kasvattamiseen eli massan nostamiseen horisontaalisesti (Hietalahti 2010, 6). Tasaisella liikuttaessa gravitaatiovoima on nolla. Alamäessä auto puolestaan luovuttaa potentiaalienergiaa.

$$F_g = m_v \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

jossa  $m_v$  on ajoneuvon kokonaismassa,  $g$  on putoamiskiihtyvyys ( $9,81\text{m/s}^2$ ) ja  $\alpha$  nousukulma vaakatasoon nähden.

### 5.2.2 Vierintävastus

Vierintävastus ( $F_r$ ) syntyy ajoneuvon kumipyörien vieressä ajoradan pinnalla. Vastus määräytyy ajoradan sekä renkaiden, ja niiden ilmanpaineen, mukaan. Renkaassa tapahtuu muodonmuutoksia, jotka aiheuttavat häviöitä. Vierintävastus voidaan laskea kaavan 6 mukaisesti. Porschen vierintävastuskerroin on taulukon 1 mukaan 0,013, mutta käytetään laskennassa nopeudesta riippuvaa vierintävastuskerrointa.

$$F_r = m_v \cdot g \cdot f_r \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

joka voidaan muokata muotoon:

$$F_r = m_v \cdot g \cdot 0,01 \cdot \left(1 + \frac{v}{100}\right) \cdot \cos \alpha \quad (7)$$

jossa  $m_v$  on ajoneuvon kokonaismassa,  $g$  putoamiskiihtyvyys,  $v$  on ajoneuvon nopeus ja  $\alpha$  ajoalustan kulma vaakatasoon nähden.

### 5.2.3 Ilmanvastus

Ilmanvastus ( $F_w$ ) on riippuvainen ajoneuvon muotoilusta, ajonopeudesta sekä vastatuulesta. Koska sähkökäyttö ei tarvitse luultavasti niin paljon jäähdytysilmaa, kuin polttomoottorikäyttö, voidaan ajoneuvon ilmanottoaukkoa pienentää ja parantaa näin aerodynaamisia ominaisuuksia. Porschen ilmanvastuskerroin on 0,3 ja otsapinta-ala  $1,96 \text{ m}^2$ . Ilmanvastuksen suuruus voidaan laskea kaavalla 8.

$$F_w = \frac{1}{2} * \rho * A_f * C_d * (v + v_w)^2 \quad (8)$$

jossa  $\rho$  on ilmantiheys,  $A_f$  ajoneuvon otsapinta-ala,  $C_d$  auton ilmanvastuskerroin,  $v$  auton nopeus ja  $v_w$  vastatuulen nopeus.

### 5.2.4 Tehonsiirron hyötysuhde

Liikettä vastustavien voimien lisäksi, myös tehonsiirtojärjestelmän häviöt kasvattavat tehontarvetta. Porschen tehonsiirtojärjestelmässä häviöt tapahtuvat laakereissa ja tiivisteissä, tasauspyörästössä sekä alennusvaihteessa. Laskennassa tehonsiirtojärjestelmän keskimääräiseksi hyötysuhteeksi on oletettu 90%. Suoralla välityksellä hyötysuhde on hieman korkeampi ja alennusvaihteita käytettäessä hieman pienempi.

### 5.2.5 Tehotarve tasaisella

Ajoneuvon tehotarvetta voidaan eri kiihdytystilanteissa tarkastella kaavan 9 avulla. Käyttöprofiilin mukaan, on tiedettävä millaista kiihtyvyyttä autolta halutaan. Kaupunkiajossa Porschen maksiminopeudeksi arvioitiin 60 km/h ja liikennevaloista kyseiseen nopeuteen halutaan kiihdyttää kahdeksassa sekunnissa.



$$P_t = \frac{\delta \cdot m_v}{2 \cdot t_a} (v_f^2 + v_b^2) + \frac{2}{3} \cdot m_v \cdot g \cdot f_r \cdot v_f + \frac{1}{5} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A_f \cdot v_f^3 \quad (9)$$

jossa  $P_t$  on ajoneuvolta vaadittu teho,  $\delta$  hitausmassoista riippuva kerroin (tyypillisesti 1,05),  $m_v$  ajoneuvon kokonaismassa,  $t_a$  haluttu kiihdytysaika,  $v_f$  ajoneuvon loppunopeus,  $v_b$  ajoneuvon perusnopeus,  $g$  putoamiskiihtyvyys,  $f_r$  vierintävastuskerroin,  $\rho$  ilmantiheys,  $C_d$  ajoneuvon ilmanvastuskerroin ja  $A_f$  ajoneuvon otsapinta-ala.

Sijoitetaan kaavaan Porschen tiedot:

$$P_t = \frac{1,05 \cdot 1742 \text{ kg}}{2 \cdot 8 \text{ s}} \left[ \left( \frac{60 \text{ m}}{3,6 \text{ s}} \right)^2 + \left( \frac{0 \text{ m}}{3,6 \text{ s}} \right)^2 \right] + \frac{2}{3} \cdot 1742 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,01 \cdot \left( 1 + \frac{60}{100} \right) \cdot \left( \frac{60 \text{ m}}{3,6 \text{ s}} \right) + \frac{1}{5} \cdot 1,202 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,3 \cdot 1,96 \text{ m}^2 \cdot \left( \frac{60 \text{ m}}{3,6 \text{ s}} \right)^3$$

$$P_t = 35448 \text{ W}$$

Taulukossa 2 on laskettu vastaavia tehotarpeita, kun 60 km/h nopeuteen halutaan kiihdyttää eri ajassa ja tehonsiirron hyötysuhde (90 %) on otettu huomioon.

TAULUKKO 2. Porschen tehotarve kiihdytettäessä 60 km/h nopeuteen

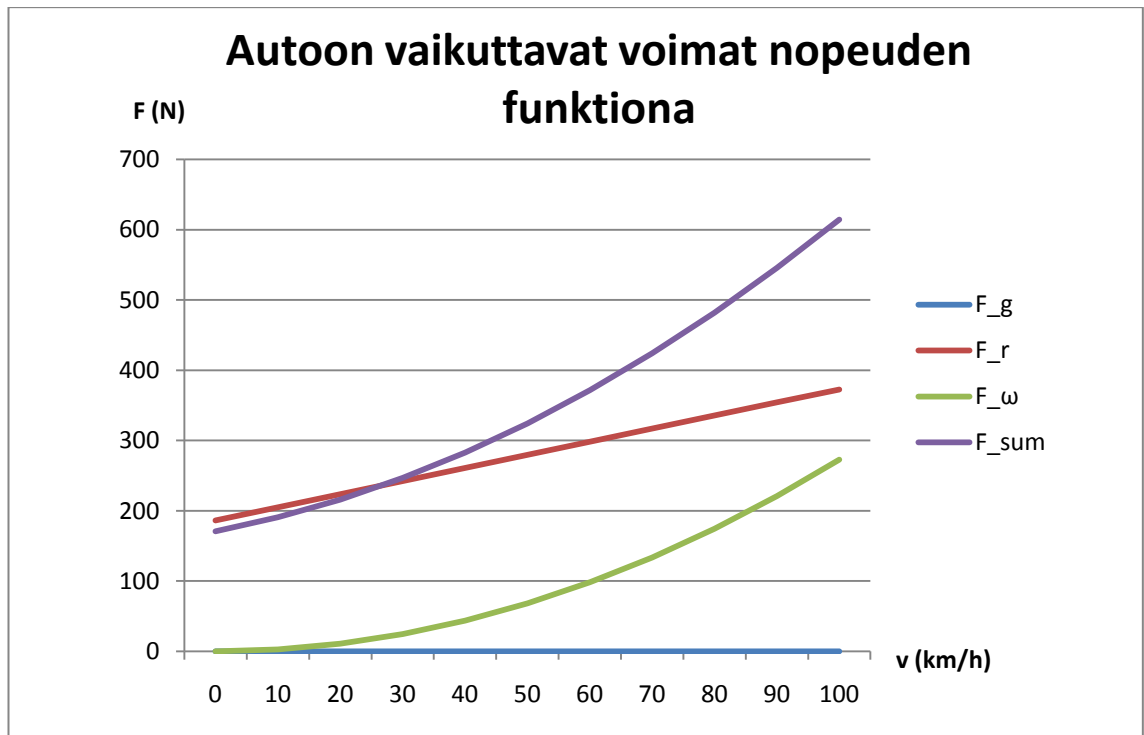
Tavoite-aika (s)	Teho-tarve (kW)	Tavoite-nopeus (km/h)
4	74,7	60
5	60,6	60
6	51,1	60
7	44,4	60
8	39,4	60
9	35,5	60
10	32,3	60
11	29,8	60
12	27,6	60
13	25,8	60

Kuten arvoista voidaan päätellä, kasvaa tehontarve eksponentiaalisesti, mitä nopeampaa haluttuun vauhtiin halutaan kiihdyttää. Kuviossa 29 on havainnollistettu taulukon 2 arvoja kuvaajalla.



KUVIO 29. Porschen tehotarve kiihdytettäessä 60 km/h nopeuteen

Porschelle suunniteltu 8 sekuntia kestävä kiihdytys vaatii siis tehoa noin 39,4 kW:n edestä, eli moottorin olisi ainakin piikkiteholtaan pystyttävä tähän. Kirjallisuudessa hitausmassojen kerroin vaihtelee 1,05–1,10 välillä, mutta yleisesti konversiolaskuissa on käytetty arvoja 1,05 ja 1,06. Mikäli kerroin olisi 1,1, Porschen vaatima teho 8 sekunnin kiihdytyksessä nousisi noin 43,3 kW:iin, eli lisätehontarve olisi 3,9 kW. Kuviossa 30 on havainnollistettuna liikettä vastustavien voimien käyttäytyminen ajonopeuden kasvaessa. Koska ajetaan tasaisella, ei gravitaatiovoima vastusta liikettä.



KUVIO 30. Porscheen vaikuttavat vastavoimat ajonopeuden funktiona

Ajoneuvon kiihtyvyys- tai hidastusmisominaisuudet voidaan laskea kaavan 10 avulla. Mikäli tulos on nolla, nopeus on vakio. Jos tulos on positiivinen, autolla on kiihtyvyyttä, ja jos tulos on negatiivinen, autolla on hidastuvuutta.

$$F_{tr} - F_r - F_\omega - F_g = m_v \frac{dv}{dt} \quad (10)$$

jossa  $F_{tr}$  on ajoneuvoa vetävä voima,  $F_r$  vierintävastus,  $F_\omega$  ilmanvastus,  $F_g$  gravitaatiovoima,  $m_v$  ajoneuvon kokonaismassa ja  $dv/dt$  on nopeuden aikaderivaatta, eli kiihtyvyys. Koska teho on voima kerrottuna nopeudella, saadaan ajotehon ( $P_{tr}$ ) yhtälöksi kaavan 11 mukainen lauseke.

$$P_{tr} = m_v * v(t) * \frac{dv}{dt} + v(t) * (F_r + F_\omega + F_g) \quad (11)$$

jossa  $m_v$  on ajoneuvon kokonaismassa,  $v$  ajonopeus,  $F_r$  vierintävastus,  $F_\omega$  ilmanvastus ja  $F_g$  gravitaatiovoima.

Tasaisella ajonopeudella ajettaessa, koska autolla ei ole kiihtyvyyttä tai hidastuvuutta, kaava sievenee muotoon:

$$P_{tr} = v(t) * (F_r + F_{\omega} + F_g) \quad (12)$$

Taulukossa 3 on esitetty Porschen tehokaskennan tulokset kaavaa 12 käyttäen. Arvot on laskettu täysin tyynelle säälle, eli vastatuulennopeuden ( $v_{\omega}$ ) arvolla nolla ja tehonsiirron h  tysuhteella 90 %.

TAULUKKO 3. Porschen tehotarve tasaisella ajonopeudella ja –pinnalla

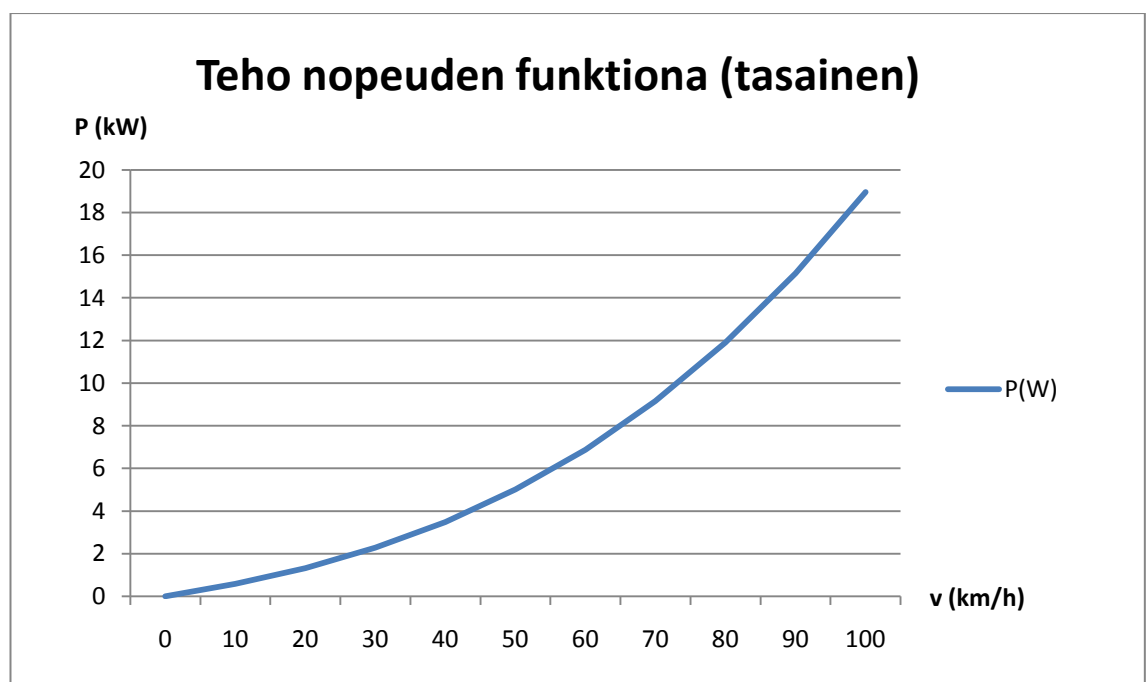
<b>v</b>	<b>F<sub>g</sub></b>	<b>F<sub>r</sub></b>	<b>F<sub>�</sub></b>	<b>F<sub>SUM</sub></b>	<b>P</b>	<b>v<sub>�</sub></b>
(km/h)	(N)	(N)	(N)	(N)	(kW)	(m/s)
100	0,00	341,78	272,68	614,46	18,96	0
90	0,00	324,69	220,87	545,56	15,15	0
80	0,00	307,60	174,51	482,11	11,90	0
70	0,00	290,51	133,61	424,12	9,16	0
60	0,00	273,42	98,16	371,59	6,88	0
50	0,00	256,34	68,17	324,50	5,01	0
40	0,00	239,25	43,63	282,87	3,49	0
30	0,00	222,16	24,54	246,70	2,28	0
20	0,00	205,07	10,91	215,98	1,33	0
10	0,00	187,98	2,73	190,71	0,59	0
0	0,00	170,89	0,00	170,89	0,00	0

Vertailun vuoksi, taulukkoon 4 on laskettu samat ajotehotarpeet ajattaessa kohtalaisen kovaan vastatuuleen.

TAULUKKO 4. Porschen tehotarve tasaisella ajonopeudella ja –pinnalla kovassa vastatuulessa

$v$	$F_g$	$F_r$	$F_w$	$F_{SUM}$	$P$	$v_w$
(km/h)	(N)	(N)	(N)	(N)	(kW)	(m/s)
100	0,00	341,78	427,42	769,20	23,74	7
90	0,00	324,69	361,87	686,56	19,07	7
80	0,00	307,60	301,77	609,37	15,05	7
70	0,00	290,51	247,13	537,64	11,62	7
60	0,00	273,42	197,94	471,36	8,73	7
50	0,00	256,34	154,20	410,53	6,34	7
40	0,00	239,25	115,92	355,16	4,38	7
30	0,00	222,16	83,09	305,24	2,83	7
20	0,00	205,07	55,71	260,78	1,61	7
10	0,00	187,98	33,79	221,76	0,68	7
0	0,00	170,89	17,32	188,21	0,00	7

Kuten taulukoista 3 ja 4 nähdään, nousee kaupunkiajoon suunniteltu 60 km/h nopeuden tehotarve reilulla 1,6 kW:llä, kun Porschea ajetaan kovassa vastatuulessa tyynen sään sijaan. Ilmanvastuksen ( $F_w$ ) merkitys korostuu sitä enemmän mitä suuremmilla nopeuksilla ajetaan. Tätä havainnollistaa taulukon 3 arvoista tehty tehokuvaaja (kuvio 31).



KUVIO 31. Porschen teho ajonopeuden funktiona tyynellä säällä

### 5.2.6 Ylämäkiajo

Tasaisella ajamisen lisäksi, autolla tulisi tietysti olla nousukykyä, jotta se suoriutuu vastaan tulevista mäkiajotilanteista. Tampereen seudun maasto on ajoprofiilin kannalta melko tasaista, mutta tehotarkasteluun otetaan Tampereen Lukonmäki, joka on suhteellisen jyrkkä koko Suomenkin mittakaavalla. Nousun pituus vaakatasossa on noin 500 metriä ja mäen nousuprosentti on 12. Mäen nousukulma voidaan laskea alla olevasta kaavasta:

$$p = \frac{h}{l} = \tan \alpha \quad (13)$$

jossa  $p$  on nousuprosentti,  $h$  on mäen nousukorkeus,  $l$  on nousumatka vaakatasossa ja  $\alpha$  on kaltevuuskulma.

Tällöin Lukonmäen korkeudeksi saadaan:

$$p = \frac{h}{l} \rightarrow 0,12 = \frac{x}{500} \rightarrow x = 0,12 \cdot 500 = 60(\text{m})$$

josta ratkaistaan kaltevuuskulman suuruus:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{60}{500}\right) = 6,843^\circ$$

Lukonmäen kaltevuuskulma on siis hieman alle 7 astetta. Lasketaan seuraavaksi kuinka suuren tehon Porsche vaatii noustessa Lukonmäkeä eri nopeuksilla. Tarkastellaan myös nouseeko tehontarve huomattavasti, jos nousu suoritetaan tyynellä säällä tai kovaan vastatuuleen. Ylämäkiajossa käytetään luultavasti alennusvaihdetta, joten tehonsiirron hyötysuhteeksi on arvioitu 88 %. Taulukossa 5 on esitetty tyyneen sään laskentatulokset.

TAULUKKO 5. Porschen tehotarve Lukonmäessä tyyneellä säällä

<b>v</b>	<b>F<sub>g</sub></b>	<b>F<sub>r</sub></b>	<b>F<sub>ω</sub></b>	<b>P</b>	<b>v<sub>ω</sub></b>
(km/h)	(N)	(N)	(N)	(kW)	(m/s)
100	2036,08	339,35	272,68	83,59	0
90	2036,08	322,38	220,87	73,28	0
80	2036,08	305,41	174,51	63,54	0
70	2036,08	288,44	133,61	54,31	0
60	2036,08	271,48	98,16	45,56	0
50	2036,08	254,51	68,17	37,23	0
40	2036,08	237,54	43,63	29,26	0

Kuten taulukosta 5 nähdään, on 50 km/h –nopeusrajan vaatima teho merkitty vihreällä, koska Lukonmäen nopeusrajoitus on 50 km/h. Vastaavat ajotehotarpeet kovassa vastatuulella on esitetty taulukossa 6.

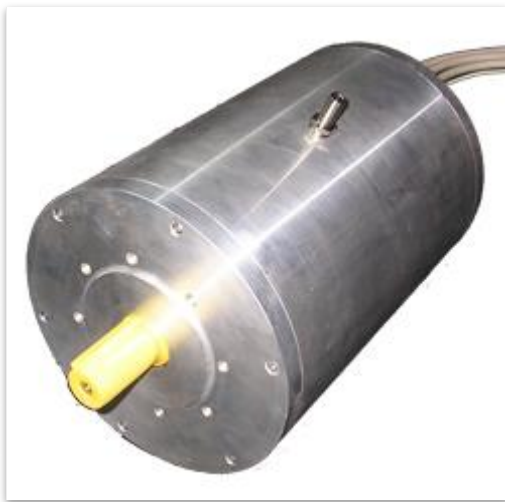
TAULUKKO 6. Porschen tehotarve Lukonmäessä kovassa vastatuulella

<b>v</b>	<b>F<sub>g</sub></b>	<b>F<sub>r</sub></b>	<b>F<sub>ω</sub></b>	<b>P</b>	<b>v<sub>ω</sub></b>
(km/h)	(N)	(N)	(N)	(kW)	(m/s)
100	2036,08	339,35	427,42	88,47	7
90	2036,08	322,38	361,87	77,28	7
80	2036,08	305,41	301,77	66,75	7
70	2036,08	288,44	247,13	56,82	7
60	2036,08	271,48	197,94	47,45	7
50	2036,08	254,51	154,20	38,59	7
40	2036,08	237,54	115,92	30,17	7

Tehotarve vastatuuleen ajettaessa kasvaa 50 km/h nopeudessa reilulla kilowatilla. Jälleen on hyvä huomata, että tehotarve kasvaa suurenevin harppauksin, kun ajonopeutta nostetaan. 100 km/h nopeudella ajettaessa, tarvitaan vastatuuleen jo noin 5 kW:ia enemmän tehoa.

### 5.3 Moottorivalinnan tulokset

Opinnäytetyön kohdeauton moottorin käytännön valintaprosessi oli ongelmallinen ja sopivan moottoriratkaisun etsintä jatkuu yhä. Syksyn 2010 alussa autoon suunniteltiin EVE:n (Electro Vehicles Europe) M4-AC90/4-L 90 kW:n oikosulkukonetta (kuva 9), joka olikin selkeästi ylimitoitettu, mutta silloin autolta oltaisiin saatu alkuperäisen veroisia suoritearvoja huippunopeuden ja kiihdytyksen suhteen. Moottorilla on kompakti koko ja se on suunniteltu ajoneuvokäyttöön. Se tehdään mittatilaustyönä ja valmistaja voi säätää niin, että pienemmillä kierroksilla moottorista saadaan irti enemmän vääntöä. Moottorin IP-suojausluokka on 67, eli se on pölytiivis ja kestää jopa hetkellisen veteen upotuksen, eli maantieajossa tiellä olevat isotkin lammikot ja voimakkaat roiskeet eivät olisi haitanneet moottoria. Nestejäähdytys takaa luotettavan toiminnan. Kyseinen kone oli lisäksi suoriutunut testikäytössä erinomaisesti, kun EVE asensi sen Paluu Tulevaisuuteen –elokuvasta tutuksi tulleeseen DeLorean-autoon, jolla ajettiin onnistuneesti ja taloudellisesti Italian läpi.



KUVA 9. M4-AC90/4-L 90 kW:n oikosulkukone (Kuva: Andrea Lombardi 2010)

Koska moottorin sijoituspaikaksi oltiin valittu vanhan vaihteiston tila (kuva 10), oli projektin alusta asti epävarmaa, mahtuuko moottori kiinnikkeineen sinne varmasti. Paikka oltiin kuitenkin päätetty ja koska akkukotelon suunnittelu auton vanhaan moottoritilaan oltiin jo aloitettu, ei sijoituspaikkaa voitu myöhemmin muuttaa.



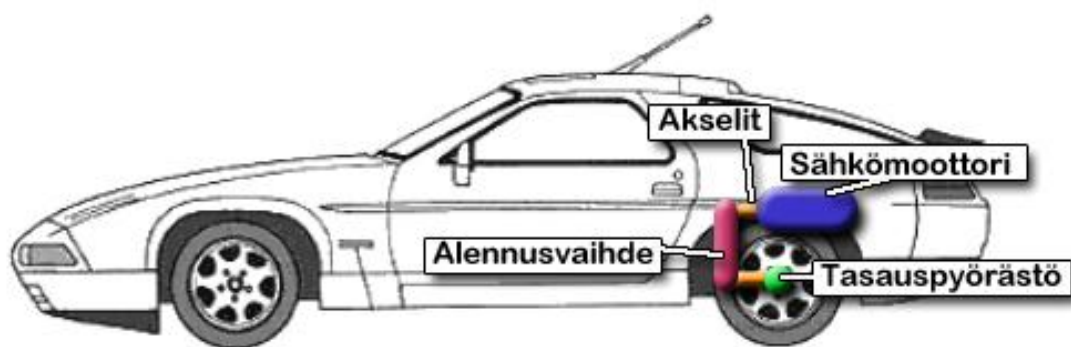
Sähköajoneuvokeskuksella toteutettiin ennen joulua ensimmäinen sähköajoneuvoasentaja-kurssi, jonka aikuisopiskelijat lopulta aloittavat Porschen fyysisen purkamisen. Purun jälkeen vaihteistotila päästiin ensimmäistä kertaa kunnolla mittaamaan. Pituttua tilalla oli reilut 60 cm ja kapeimman kohdan leveys oli 26 cm. Tämän johdosta EVE:n 90 kW:n tai edes 50 kW:n moottori eivät fyysisesti voineet mahtua tilaan. 50 kW:n moottorin halkaisija oli 26,2 cm, joten se olisi pienellä pohjanmuokkaustyöllä saattanut mahtua. Senpä takia moottoriksi suunniteltiin saman valmistajan 30 kW:n versiota, joka olisi kuitenkin suoriutunut hyvin kaikista kuormitustilanteista, joita edellisessä luvussa laskettiin.



KUVA 10. Moottorin sijoituspaikka (pituus noin 60 cm, leveys 26,2 cm kapeimmasta kohdasta)

Juuri ennen kuin vuosi vaihtui, saimme kuitenkin tietää, että ePorsche-projekti ei saanut sille haettua Fortum-säätiön rahoitusta. Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että moottori on saatava sponsoroituna joltain suurelta teollisuuden valmistajalta. Projektin yhteydessä kävin läpi pääosan Euroopassa toimivista sähkömoottorien valmistajista, joista kukaan ei tässä vaiheessa ollut halukas sponsoroimaan autoon moottoria.

ABB on kuitenkin mahdollisesti suostuvainen sponsoroimaan teollisuusmoottorin, kunhan sopiva moottoriratkaisu löydetään. Teollisuusmoottorit ovat isokokoisia ja käytännössä kaikki ABB:n mallit, joiden suoritearvot riittäisivät Porschen tarpeisiin, ovat liian isoja suunniteltuun moottoritilaan. Kesän ja syksyn 2011 aikana moottoriratkaisun toteutusta tullaan jatkamaan allekirjoittaneen toimesta, vaikka opinnäytetyö valmistuukin jo aiemmin. Tällä hetkellä tutkin katsastusvirkamiesten kanssa, onko moottori mahdollista sijoittaa Porschen takakonttiin ja saada alennusvaihteella voimansiirto vietyä pohjan läpi akselille. Moottorin akseli siis tulisi kiinni alennusvaihdelaatikon yläosaan ja kiinnittyisi auton voimansiirtoon laatikon alaosan toiselta puolelta. Toteutuksen suunniteltu rakenne on esitetty kuviossa 32.



KUVIO 32. Mahdollinen alennusvaihderatkaisu

Vaikka autoon ei käytännössä ole moottoria vielä löydetty, suoritetaan Porschelle kuitenkin suorituskykylaskelmat sille aiemmin suunnitellulla EVE:n 30 kW:n moottorilla, sillä se vastaa tarjolla olevista moottoreista parhaiten Porschen käyttöprofiilia.

Tasavirta- eli DC-käytön tarkastelu päätettiin jättää jo projektin alkuvaiheessa pois. AC-käyttö oli kaupunkiajoon suunniteltavalle Porschelle huomattavasti järkevämpi taloudellisuuden suhteen. Regeneratiivisen jarrutuksen suunnittelu DC-käyttöön olisi myös ollut hankalaa. Koska kestopagneettimootoreihin ei budjettia olisi ollut, eivät hiiliharjalliset DC-moottorit olisi olleet järkevä ratkaisu niiden huoltotarpeenkin takia.

#### 5.4 Invertterivalinnan tulokset

ABB:n myyntipäällikkö vieraili syyskuussa 2010 Tampereen Sähköajoneuvokeskuksella tutustumassa ePorsche-projektiin. Keskusteluiden yhteydessä sovittiin, että ABB tulee sponsoroita taajuusmuuttajan, sillä hanke on mielenkiintoinen ja ensimmäinen urheiluautokonversio Suomessa. ABB:n valikoimasta löytyy ACSM1-taajuusmuuttaja (kuva 11), joka todettiin parhaiten projektiin sopivaksi.



KUVA 11. ACSM1-tuoteperhe (Kuva: ABB, 2009)

ACSM1:n rakenne on modulaarinen, jolloin turha verkkokäytön tasasuuntaajyksikkö voidaan jättää suoraan pois ja akusto voidaan kytkeä suoraan jännitevälipiiriin. EVE:n M2-AC30-L 30 kW:n oikosulkukone on nominaaliteholtaan 30 kW ja –virraltaan hieman yli 60 A. Maksimivirta on EVE:n

teknikon mukaan noin 110 A. Tarkkoja virtarajoja ei vielä EVE:n dokumentoinnista löydy, sillä kyseessä on melko uusi moottori. Ilmoitetut arvot perustuvat sähköpostin välityksellä saatuihin tietoihin. ACSM1:n runkokoot ja tekniset tiedot on esitetty kuviossa 32.

ACSM1 - 04XX - XXXX - 4 + XXXX

Feature / frame size	A	B	C	D	E
<b>Current &amp; Power</b>					
Nominal current	2.5 to 7.0 A	9.5 to 16 A	24 to 46 A	60 to 90 A	110 to 210 A
Maximum current	5.3 to 14.7 A	16.6 to 28 A	42 to 81 A	105 to 150 A	165 to 351 A
Typical motor power	0.75 to 3 kW	4 to 7.5 kW	11 to 22 kW	30 to 45 kW	55 to 110 kW / 160 kW <sup>1)</sup>
Braking chopper	●	●	●	●	●
Braking resistor	□	□	□	□	□
Mains choke	□	□	□	□	●
Mains filter (EMC)	□	□	□	□	●
<b>Mounting and cooling</b>					
Removable power connectors	●	●	-	-	-
Removable control connectors	●	●	●	●	●
Air-cooled variant	■	■	■	■	■
- Back plate mounting	●	●	●	●	●
- DIN-rail mounting	●	●	-	-	-
- Horizontal mounting	●	●	●	●	●
Push-through variant	-	-	■	■	□
Cold plate variant	-	-	■	■	-
Liquid-cooled variant	-	-	-	-	■

<sup>1)</sup> Power range up to 160 kW with the liquid-cooled variant.

● = standard    □ = option, external  
■ = product variant    - = not available

KUVIO 33. ACSM1-taajuusmuuttajan saatavilla olevat rungot (ABB, 2010)

Kun otetaan huomioon moottorille ilmoitetut arvot, on runkokoko D parhaiten soveltuva. Tällöin EVE:n ilmoittamat teho- ja virtarajat pysyvät kyseisen koon rajojen sisällä.

ACSM1:n ohjaustavat ovat nopeus- ja momenttiohjaus. Valittava ohjaustapa on DTC, josta kerrottiin tarkemmin AC-moottorien ohjaustavoista kertovassa luvussa. ABB oli itseasiassa ensimmäinen valmistaja, joka otti DTC-ohjauksen käyttöön taajuusmuuttajissaan (Lappeenrannan teknillinen yliopisto: Taajuusmuuttaja 2010). ACSM1:stä löytyy myös jarrukatkoja vakiona, jolloin regeneratiivisen jarrutuksen toteuttamiseen tarvitaan vain erillinen jarruvastus. Taajuusmuuttajan IP-suojaluokitus on 21 ja pienin toimintalämpötila on -10°C. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että ACSM1:lle rakennetaan tärinävaimennettu kotelo esimerkiksi pleksistä, jonka sisään laitetaan talvikäyttöä varten pieni lämmitysvastus lämmittämään taajuusmuuttaja käyntilämpötilaan ja estämään kondenssiveden syntyä. Vastaavasti kesähelteillä on huolehdittava tarvittavasta jäähdytyksestä, koska taajuusmuuttajan tehoelektroniikka tuottaa paljon lämpöä.

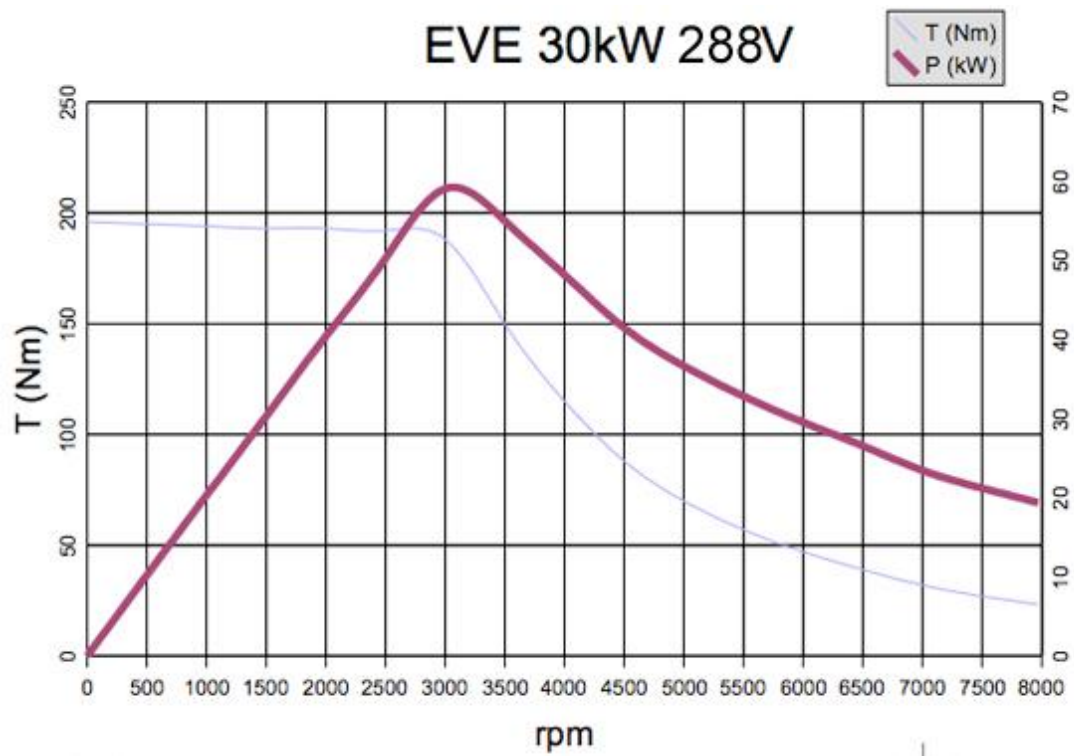
### 5.5 Suorituskykyvertailu polttomoottori- ja sähköversion välillä

EVE:n 30 kW:n oikosulkukoneen tarkemmat vääntömomentti- ja tehoarvot on ilmoitettu taulukossa 7.

TAULUKKO 7. M2-AC30-L vääntömomentti ja teho pyörimisnopeuden suhteen (Electro Vechiles Europe 2011)

n	T	P
(rpm)	(Nm)	(kW)
0	196	0
500	195	10,2
1000	194	20,3
1500	193	30,3
2000	193	40,4
2500	192	50,3
3000	188	59,1
3500	150	55
4000	115	48,2
4500	88	41,5
5000	70	36,7
5500	57	32,8
6000	47	29,5
6500	39	26,5
7000	32	23,5
7500	27	21,2
8000	23	19,3

Moottorin nimellispyörimisnopeudeksi ilmoitetaan 3600 1/min, joten kuvion 33 perusteella nimellisvääntömomentti on noin 140 Nm. Huippuvääntömomentti moottorilla on 200 Nm ja maksimiteho noin 60 kW, joita moottori kestää 60 sekuntia. Maksimitehonsa puolesta oikosulkumoottori selviytyy hyvin kaikista luvussa 5.2 vaadituista tehotarpeista.



KUVIO 34. M2-AC30-L –moottorin vääntömomentti ja teho pyörimisnopeuden funktiona (Electro Vehicles Europe 2011)

Porschen renkaat 928 S4 –malleissa ovat yleisesti kokoa 225/50 VR 18, jolloin renkaan halkaisija on 60,5 cm. Alennusvaihdetta Porschelle ei vielä olla päätetty, mutta Powerglide™ oli lupaavin ratkaisu projektin aikana, joten käytetään laskennassa apuna sen välityssuhteita. Powergliden ja tasauspyörästäön välityssuhteiden tulosta syntyvä lopullinen vaihteisto on esitetty taulukossa 8.

TAULUKKO 8. Alennusvaihteiden suuruudet

Vaihde	Powerglide välitys	Tasauspyörästä	Lopulliset välityssuhteet
1	2,18	2,64	1 : 5,75
2	1,82	2,64	1 : 4,80
3	1	2,64	1 : 2,64

Porschen teoreettiset maksiminopeudet ( $v$ ) kyseisillä alennusvaihteilla voidaan laskea kaavalla 14.

$$v = \frac{n_n}{60 * G_{gr}} * d * \pi * 3,6 \quad (14)$$

jossa  $n$  on moottorin pyörimisnopeus,  $G_{gr}$  välityssuhde ja  $d$  renkaan halkaisija.

Lasketaan esimerkkinä auton teoreettinen maksiminopeus pienimmällä alennusvaihteella:

$$v = \frac{8000 \frac{1}{min}}{60 * 5,75} * 0,605m * \pi * 3,6 = 158,67 km/h$$

Toisella vaihteella teoreettinen nopeus on 190,07 km/h ja kolmannella 345,58 km/h. Autoa vetävä voima voidaan laskea kaavalla 15.

$$F_{veto} = \frac{T * G_{gr}}{r} \quad (15)$$

jossa  $T$  on vääntömomentti,  $G_{gr}$  on välityssuhde ja  $r$  on renkaan säde.

Auton hetkellinen kiihtyvyys ( $a$ ) voidaan laskea kaavalla 16 ja kiihdytysajan likiarvo ( $\Delta t$ ) kaavalla 17.

$$a = \frac{F_{veto} - F_r - F_{\omega}}{m_v} \quad (16)$$

jossa  $F_{veto}$  on autoa vetävä voima kaavan 15 mukaisesti,  $F_r$  on vierintä- ja  $F_{\omega}$  ilmanvastus ja  $m_v$  on auton kokonaismassa.

$$\Delta t = \frac{\frac{v_n - v_{n-1}}{3,6}}{\frac{a_n - a_{n-1}}{2}} \quad (17)$$

jossa  $v_n$  on auton senhetkinen nopeus,  $v_{n-1}$  auton edellisen portaan nopeus,  $a_n$  auton senhetkinen kiihtyvyys ja  $a_{n-1}$  edellisen portaan kiihtyvyys. Kun kaavojen 14–17 mukaiset laskut suoritetaan jokaiselle välityssuhteelle, saadaan Porschelle taulukon 9 mukaiset suorituskykyarvot.



TAULUKKO 9. Porschen (todellinen) laskettu suorituskyky eri vaihteilla

	Vaihte 1 1 : 5,75			Vaihte 2 1 : 4,80			Vaihte 3 1 : 2,64			
n (rpm)	v (km/h)	a (m/s <sup>2</sup> )	t (s)	v (km/h)	a (m/s <sup>2</sup> )	t (s)	v (km/h)	a (m/s <sup>2</sup> )	t (s)	η (%)
0	0,00	2,04	0,00	0,00	1,69	0,00	0,00	0,88	0,00	75
500	9,92	2,02	1,36	11,88	1,66	1,97	21,60	0,85	6,92	78
1000	19,83	1,99	2,73	23,76	1,64	3,97	43,20	0,80	14,18	85
1500	29,75	1,96	4,12	35,64	1,61	6,00	64,80	0,74	21,96	89
2000	39,67	1,94	5,53	47,52	1,58	8,08	86,39	0,67	30,49	90
2500	49,58	1,91	6,96	59,40	1,54	10,20	107,99	0,58	40,15	91
3000	59,50	1,84	8,43	71,27	1,46	12,39	129,59	0,45	51,81	93
3500	69,42	1,40	10,13	83,15	1,08	14,99	151,19	0,15	71,77	94
4000	79,33	0,98	12,45	95,03	0,71	18,67	172,79	-0,16	-969,52	91
4500	89,25	0,65	15,83	106,91	0,42	24,49	194,39	-0,44	-989,58	87
5000	99,17	0,41	21,01	118,79	0,20	35,10	215,98	-0,69	-1000,21	85
5500	109,08	0,23	29,55	130,67	0,03	64,08	237,58	-0,93	-1007,62	80
6000	119,00	0,08	47,49	142,55	-0,13	-0,47	259,18	-1,17	-1013,34	79
6500	128,91	-0,06	367,51	154,43	-0,27	-17,15	280,78	-1,41	-1017,99	78
7000	138,83	-0,19	345,11	166,31	-0,40	-27,00	302,38	-1,67	-1021,89	75
7500	148,75	-0,30	333,70	178,19	-0,52	-34,12	323,98	-1,92	-1025,23	75
8000	158,66	-0,40	325,74	190,07	-0,64	-39,79	345,58	-2,19	-1028,15	75

Taulukon 9 aika ( $t$ ) kyseiseen vauhtiin vaadittu kokonaiskiihdytysaika. Kuten taulukon arvoista huomataa, jokaisella vaihteella on tietty raja, kun kiihtyvyys kääntyykin hidastuvuudeksi. Hidastuvuusalueet ovat tekstiväritään punaisia ja niiden tausta on haaleampi. Kiihtyvyys- ja hidastuvuusraja-aluetta katsomalla, voidaan nähdä jokaisella vaihteella saavutettava maksiminopeus. Ykkösvaihteella maksimi nopeus on noin 120 km/h, kakkosvaihteella noin 130 km/h ja suoravedolla, eli pelkällä perävälityksellä, saavutetaan arvioimalla noin vajaan 160 km/h:n nopeus. Arvot vastaavat lähes täysin Sähköautot Nyt! – yhteisön kehittämän eSimu-laskurin suoritearvoja. Luonnollisesti autolla on enemmän kiihtyvyyttä, mitä suurempi välityssuhde on. Huippunopeus puolestaan on sitä suurempi, mitä pienempi välityssuhde on. Taulukossa 9 sähkömoottorin hyötysuhde ( $\eta$ ) on arvioitu EVE:n teknikon antamien tietojen ja epätahtimoottorien tyypillisten hyötysuhteiden perusteella.

Luvussa 5.2.4 laskettiin Porschen tehotarvetta eri kiihdytystilanteissa ja auton toivottiin saavuttavan 60 km/h nopeus kahdeksassa sekunnissa. Taulukon 9 vaihteen 1 sarakkeesta voidaan nähdä, että n. 60 km/h nopeus saavutetaan



kuin saavutetaankin 8,43 sekunnissa, joten EVE:n 30 kW:n moottori suoriutuu tavoitteesta lähes optimaalisesti. Taulukossa 10 on vielä lopuksi vertailtu alkuperäisen polttomoottoriversion ja sähkökonversion suorituskykyä.

TAULUKKO 10. Polttomoottoriauton ja sähkökonversion suorituskykyvertailu

	vaihde	$v_{\max}$ (km/h)	$P_{\max}$ (kW)	kiihtyvyys 0...100 km/h (s)	$T_{\max}$ (Nm)
Polttomoottori	-	265	235 kW	6,6	430
Sähkökonversio	1	≈120	≈60	≈21	805
Sähkökonversio	2	≈130	≈60	≈22	672
Sähkökonversio	3	≈160	≈60	≈37	343

Vääntömomentin maksimiarvot on laskettu kertomalla välityssuhde moottorin nimellismomentilla (140Nm).

## 6 EXCEL-TYÖKALU MOOTTORIN JA INVERTTERIN VALINTAAN

Opinnäytetyön liitteeksi tehtiin sähkömoottorin mitoitus työkalu, joka laskee annetulle muunnosautolle automaattisesti tämän opinnäytetyön kaltaiset tehomitoitukset ja ehdottaa sopivia moottoreita, sekä niihin sopivia inverttereitä. Mitoitustyökalun moottorivaihtoehdot ovat pelkästään AC-moottoreita, sillä niiden käyttö muunnosautoissa on todennäköisintä. DC-moottorivaihtoehdot saatetaan lisätä ohjelmaan myöhemmin, kun sitä päivitetään. Liitteestä 1 löytyy työkalun käyttöliittymän etusivu sekä internetosoite, josta taulukko-ohjelman voi ladata omalle koneelle. Ohjelma käyttää laskentaan samoja kaavoja, jotka on aiemmin esitelty tässä opinnäytetyössä. Työkalun tarkoitus on yksinkertaistaa ja selittää laskennan periaatteita, jolloin asiasta vähemmän tietäväkin saa nopeasti kuvan suunnitellun muunnosauton tehotarpeista. Työkalua tullaan parantelemaan ja päivittämään eri versiopäivitysten myötä.

## 7 YHTEENVETO

Kun käytännön projekti alkoi vuoden 2010 syksyllä, oli odotettavissa, ettei muunnosauto valmistu ainakaan ennen kesää 2011. Projekti koki kaksi isoa takaiskua, kun emme saaneet kuudetta opinnäytetyöntekijää, joka olisi suunnitellut autoon sopivan alennusvaihteratkaisun, ja kun Fortumilta haettu projektiraha ei saanut hyväksyntää. Sen lisäksi opiskelijoiden henkilökohtaiset apuraha- ja stipendihakemukset eivät menneet läpi, jolloin projektiin oli mahdotonta keskittyä täysipäiväisesti. Suunnittelua hidasti myös aiempien konversioiden huono dokumentointi, joka tarkoitti sitä, että jokaiseen asiaan jouduttiin käytännössä tutustumaan alusta alkaen. Mitoitus kuitenkin saatiin suoritettua teorialtasolla. Vaikka invertteri oltaisiin voitu jo periaatteessa tilata ABB:ltä, on kuitenkin viisasta odottaa sopivan moottoriratkaisun löytymistä, jotta invertterin kokoluokka on varmasti oikea. Käytännön projekti jäi siis toistaiseksi toteutumatta rahoitusongelmien takia. Porsche saadaan kuitenkin toivottavasti tieliikennekäyttöön vuoden 2012 aikana.

Tehdasvalmisteisten sähköautojen tulevaisuus näyttää tällä hetkellä valoisalta. Suuret autovalmistajat ovat tahoillaan pikku hiljaa tuomassa markkinoille ainakin yhtä täyssähköistä mallia, joten sähkökäyttöjen ja etenkin akkuteknologian kehitys jatkuu hyvää vauhtia eteenpäin. Muun muassa Viron valtio on antanut positiivisia merkkejä kehityksestä, kun se maaliskuussa ilmoitti rakennuttavansa koko maan kattavan sähköautojen pikalatausverkoston. Alustavasti kuntien sosiaalityöntekijät tulevat toimimaan koetestaajina, kun heidän käyttöönsä luovutetaan 507 Mitsubishin i-Miev –sähköautoa (Kauppalehti 13.3.2011). Aika näyttää kuinka muut valtiot tarttuvat aiheeseen.

Sähköautojen hyötysuhteet ovat riippuvaisia sähkön tuotantotavasta, joissa kokonaishyötysuhteen kannalta tapahtuvat suurimmat häviöt. Itse auton hyötysuhde voi olla hyvinkin korkea. Hiilidioksidipäästöt ovat myös suoraan yhteydessä tuotantotapaan. Akusto on kuitenkin edelleen sähköautojen suurin kompastuskivi. Akkuteknologiat, ja niiden hintakehitys, tulevat pitkälti ratkaisemaan, millä vauhdilla sähköautot tulevat yleistymään. Akkujen latausmahdollisuudet ovat toinen merkittävä tekijä. Pelkkien pistorasia- ja

lämmitystolppapisteiden käyttö ei ole realistista, kun aletaan puhua suurista ajoneuvomääristä. Tämän takia valtio nousee tärkeään asemaan, sillä pikalatauspisteiden rakentamiseen ja tarvittaviin jakeluverkon rakenteellisiin muutoksiin vain sillä on tarvittavat resurssit ja valtuudet. Lisäksi Suomen lainsäädäntö ei ainakaan tällä hetkellä kannusta esimerkiksi muutosautojen rakentajia, vaikeiden katsastusprosessien ja korkean verotuksen takia. Katsastuksen ja toteutuksen laadun suhteen tehdasvalmisteiset autot tulevat luultavasti pärjäämään paremmin, sillä ne ovat suoraan tieliikennekelpoisia, kun ne on hyväksytty Suomen markkinoille. Edellä mainitut asiat ovat käsittelyn alla eduskunnassa, mutta niiden lopputuloksia ja etenkin aikatauluja on mahdoton ennakoida. Sähköautoilla on siis paljon potentiaalia, mutta niiden on ensin ylitettävä monta teknistä ja poliittista estettä, ennen kuin ne alkavat todella yleistyä Suomessa ja muualla maailmassa.

Kaiken kaikkiaan koin opinnäytetyöprosessin erittäin opettavaiseksi ja aion pysyä käytännön projektissa mukana niin kauan kuin intoa aiheetta kohtaan riittää. Moottori- ja invertterimitoituksen periaatteet tulivat vajaan vuoden aikana hyvin tutuiksi, ja uskon oppimieni tietojen auttavan minua myös työurallani. Toivon oman työpanokseni auttaneen Sähköautot Nyt! –yhteisöä etenkin moottorin mitoitusperiaatteiden ymmärtämisessä.

## LÄHTEET

Lo, E.W.C.; Review on the configurations of hybrid electric vehicles Power Electronics Systems and Applications. 2009. PESA 2009. 3rd International Conference on 20-22 May 2009. s. 1–4.

Liu, J., Peng, H. Control Optimization for a Power-Split Hybrid Vehicle. Proceedings of the 2006 American Control Conference, Minneapolis, Minnesota, Yhdysvallat. IEEE. s. 466–471 .

Hietalahti, L. 2010. Sähkökäyttö- ja hybritekniikka ajoneuvo- ja työkonikäyttöön. Tampere: Tammertekniikka.

Hannikainen S. 2009. Akuston liittäminen hybridijärjestelmään. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Liu, J., Peng, H., Filipi, Z. Modeling and Analysis of the Toyota Hybrid System. Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Monterey, California, Yhdysvallat. 2005. IEEE. s. 134–139.

Äijälä I. 2008. Jaetuntehon hybridijärjestelmän mallintaminen. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Gao, Y., Ehsani, M. A Torque and Speed Coupling Hybrid Drivetrain – Architecture, Control, and Simulation. IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 21 (2006) No. 3. s. 741–748.

Amish Pleasures, Inc. 2010. The History of Electric Vehicles. Luettu 15.5.2011. <http://www.electricvehiclesnews.com/History/historyearly.htm>

Chris Paine. 2006. Who Killed the Electric Car? Dokumenttielokuva.

Sähköautot Nyt! -yhteisö. 2010. SähköautoWiki: 1. Historia. Luettu 16.5.2011.  
<http://www.sahkoautot.fi/wiki:historia>

Motiva Oy. 2011. Motiva - Asiantuntija energian ja materiaalien tehokkaassa käytössä. Luettu 5.6.2011.  
[http://www.motiva.fi/liikenne/polttoaineet\\_ja\\_ajoneuvotekniikka/polttoaineet/sahko](http://www.motiva.fi/liikenne/polttoaineet_ja_ajoneuvotekniikka/polttoaineet/sahko)

Ehsani M., Gao Y., Emadi A., 2010, Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles, Second Edition, Taylor and Francis Group, Boca Raton Florida USA, s. 534.

Tikka V. 2010. Sähköautojen pikalatauksen verkkovaikutukset. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Diplomityö.

Alatalo M. European Batteries, Sähköautotyöpaja. Seminaariesitys VTT, 24.5.2010

Henkilöliikennetutkimus 2004-2005, 2006, WSP LP-Konsultit Oy, Liikenne- ja viestintäministeriö, Tiehallinto ja Ratahallintokeskus, Dark Oy, ISBN 951-803-682-9

Helsinki Metropolia University of Applied Sciences. 2010. ERA, Electric Raceabout. Luettu 18.5.2011.  
<http://www.raceabout.fi/era/home>

Ojanperä K. Tekniikka ja talous: Energia. 2010. Suomalaisten opiskelijoiden sähköauto otti hopeaa. Julkaistu 17.9.2010. Luettu 18.5.2011.  
<http://www.tekniikkatalous.fi/energia/article502615.ece>

Sähköautot - Nyt!. Teollisuusmoottorit ja ajoneuvojen moottorit. 2010. Luettu 20.5.2011.  
<http://www.sahkoautot.fi/wiki:moottori>

Sähkömoottori - teollisen yhteiskunnan käyttövoima. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2010. Luettu 20.5.2011.

[http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical\\_engineering/articles/electrical\\_motor/Sivut/Default.aspx](http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical_engineering/articles/electrical_motor/Sivut/Default.aspx)

Sähkökäytöt. Mekatroniikan peruskurssi. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Konetekniikan osasto. 2007. s. 3–10.

Hoekstra Robert L. 1992. Robotics and Automated Systems. Thomson South-Western.

Korpinen, L. 1997. Sähkökoneet: osa 1 ja 2. Luettu 20.5.2011.

[http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/10sahkokoneet\\_1osa.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf)

Aura L., Tonteri A.; Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet.; WSOY 1994, s. 446.

Aura L., Tonteri A.; Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet.; WSOY 1996, s. 544.

Match L., Morgan J.; Electromagnetic and Electromechanical Machines.; John Wiley & Sons 1987, s. 574.

Finken T. 2010. Study of PMSM for HEV. Institut für Elektrische Maschinen. Diplomityön tehtävänanto. Luettu 22.5.2011.

<http://www.iem.rwthachen.de/index.pl/masterarbeiten?wid=1648&func=viewSubmission&sid=1206>

Kokkonen J. 2007. Sähkökäytön valintaperiaatteet ja momimoottorikäytöt malmin laaduntasauksessa. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Diplomityö.

Lander C. W. Power Electronics, Second Edition. McGraw-Hill. 1987.

Aura, Lauri&Tonteri, Antti J. Sähkömiehen käsikirja 2.WSOY. Porvoo 1986. ISBN 951-0-13479-1.

N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications and Design, Second Edition, John Wiley & Sons, 1995.

Tehoelektroniikan perusteet. 2010. Lappeenrannan teknillisen yliopisto. Kurssimateriaali. Luettu 22.5.2011.

[http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/kurssit/TEL\\_1010/Materiaali%202011/Pruju%202011/alkuosa2011.pdf](http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/kurssit/TEL_1010/Materiaali%202011/Pruju%202011/alkuosa2011.pdf)

Taajuusmuuttaja. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2010. Luettu 22.5.2011.

[http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical\\_engineering/articles/inverter/Sivut/Default.aspx](http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical_engineering/articles/inverter/Sivut/Default.aspx)

Netrino LLC. 2011. Pulse Width Modulation. Lueattu 23.5.2011.

<http://www.netrino.com/Embedded-Systems/How-To/PWM-Pulse-Width-Modulation>

Hakola T. 2008. Taajuusmuuttajakäytön testausjärjestelmän käyttöönotto. Metropolia ammattikorkeakoulu. Insinööritoimisto.

Sähkömoottorikäytöt. ABB TTT-läsikirja. 2000. Luettu 23.5.2011

[http://heikki.pp.fi/abb/180\\_0007.pdf](http://heikki.pp.fi/abb/180_0007.pdf)

928 International Ltd. 2011. Technical Information. Luettu 16.5.2011.

<http://www.928intl.com/>

Kauppalehti. 13.3.2011. Virossa jättisatsaus sähköautoihin. Luettu 4.6.2011.

<http://www.kauppalehti.fi/5/i/talous/uutiset/etusivu/uutinen.jsp?oid=20110364975&ext=rss>



Mitoitustyökalun voi ladata omalle koneelle alla löytyvästä osoitteesta:

<http://www.jukkapekkapirhonen.com/mitoitustyokalu.html>

Versio	päiväys
1.0	5.6.2011

## eMotor & Inverter

Tämä taulukolaskentayökalu on tarkoitettu sähkömoottorin ja invertterin valintaan sähkömuunnosautoon. Versio 1.0 laskee toistaiseksi vain auton tehotarpeet erilaisissa kuormitustilanteissa sekä suosittelee mahdollisesti sopivaa moottoria.

Toistaiseksi ohjelma ehdottaa vain AC-moottoreita.

Työkalua tullaan päivittämään säännöllisesti vuoden 2011 aikana.

### Toiminta:

1. Syötä muunnosauton tiedot alhaalta löytyvälle, **punapohjaiselle** "Auton tiedot"-välilehdelle.
2. Kun olet syöttänyt kaikki tarvittavat tiedot, voit tarkastella muilta välilehdiltä auton tehomitoituksen ja moottori- sekä invertterivalinnan tuloksia.

Tämä työkalu on tehty osana opinnäytetyötä:  
**ePorsche - sähkömoottorin ja invertterin valinta sähkömuunnosautoon**  
Tekijä: Jukka-Pekka Pirhonen  
040 5595 368  
[emoottori@gmail.com](mailto:emoottori@gmail.com)

Versio Päiväys

1.0 5.6.2011

Tämä taulukkolaskentatyökalu on tarkoitettu sähkömoottorin ja invertterin valintaan sähkömuunnosautoon. Versio 1.0 laskee toistaiseksi vain auton tehotarpeet erilaisissa kuormituslanteissa sekä suosittelee mahdollisesti sopivaa moottoria.

Toistaiseksi ohjelma ehdottaa vain AC-moottoreita.

Työkalua tullaan päivittämään säännöllisesti vuoden 2011 aikana.

Toiminta:

Auton tiedot

Kiihtyvitys

Tasaisella ajo

Ylämäkiajo

Komponentit

Välilehti

Välilehden info

Syötä haluamasi auton tiedot tänne.  
Ilmoittaa auton tehotarpeen tavoitenopeuteen eri kiihdytysajoille.  
Ilmoittaa auton tehotarpeen tasaisella ajettaessa eri tuulioloissa.  
Ilmoittaa auton tehotarpeen ylämäkiajossa eri tuulioloissa.  
Täältä löydät autoon mahdollisesti sopivan moottori- ja invertterivaihtoehdon.

Info

Auton tiedot

Kiihtyvitys

Tasaisella ajo

Ylämäkialoj

Komponentti